

基于 ANFTSM 方法的分布式电驱动车 操纵稳定性控制

郭莉蕊, 魏佳帅, 陈克, 王楷焱

(沈阳理工大学 汽车与交通学院, 沈阳 110159)

摘要: 为提高分布式电驱动车的操纵稳定性, 依据车辆动力学特点, 设计基于直接横摆力矩控制的分层控制系统。提出一种自适应非奇异快速终端滑模(adaptive nonsingular fast terminal sliding mode, ANFTSM)控制器作为上层控制器, 计算车辆所需的附加横摆力矩; 采用二次规划优化算法设计最优力矩分配控制器作为下层控制器, 将附加横摆力矩以最优的方式分配给4个车轮的轮毂电机, 并根据车辆转向状态确定轮毂电机输出的转矩; 引入自适应机制调整滑模面的参数, 使系统能够在不确定性和扰动的影响下保持稳定。仿真实验结果表明, 本文提出的控制系统可降低整车的横摆角速度和质心侧偏角波动, 在车辆操纵稳定性方面具有可行性和有效性。

关键词: 分布式电驱动; 操纵稳定性; 自适应非奇异快速终端滑模控制; 转矩分配

中图分类号: U461.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2025.03.013

Manipulation Stability Control of Distributed Electric Drive Vehicle Based on ANFTSM Method

GUO Lirui, WEI Jiashuai, CHEN Ke, WANG Kaiyan

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: In order to improve the operational stability of distributed electric drive vehicles, a hierarchical control system based on direct yaw torque control is designed according to the characteristics of vehicle dynamics. An adaptive nonsingular fast terminal sliding mode (ANFTSM) controller is proposed as the upper controller to calculate the additional yaw moment required by the vehicle. The quadratic programming optimization algorithm is used to design the optimal torque distribution controller as the lower controller, and the additional yaw torque is optimally distributed to the hub motors of the four wheels, and the torque output by the hub motors is determined according to the steering state of the vehicle. An adaptive mechanism is introduced to adjust the parameters of the sliding surface, so that the system can remain stable under the influence of uncertainty and disturbance. The simulation results show that the control system proposed in this paper can reduce the fluctuation of yaw velocity and centroid deflection angle of the whole vehicle, and is feasible and effective in the operational stability of the vehicle.

Key words: distributed electric drive; operational stability; adaptive non-singular fast terminal sliding mode control; torque distribution

分布式电驱动汽车具有四轮独立可控、结构紧凑、转矩控制灵活等优点,但其操纵稳定性较差^[1]。直接横摆力矩控制(direct yaw-moment control, DYC)可独立控制分布在不同车轮上的驱动力矩,是车辆必要的主动安全控制系统,也是提高车辆操纵稳定性的一种典型方法^[2-3]。DYC通常采用上、下两层控制:上层为运动跟踪控制层,计算附加横摆力矩;下层为转矩分配控制层,将附加横摆力矩分配给各轮毂电机。

控制系统中控制策略可分为集中式和分层式两大类,集中式控制的应用场景较为有限,分层式控制在复杂系统中越来越受到重视。滑模控制(sliding mode control, SMC)、鲁棒控制及模型预测控制(model predictive control, MPC)等算法在分层控制器的设计中均有应用,其中滑模控制应用最广泛。文献[4-5]在上层控制策略设计中应用滑模控制器计算期望的附加横摆力矩,结果显示抖振现象严重,车辆的操纵稳定性未达到最佳控制效果,尚需改进。文献[6-7]采用改进滑模函数设计附加横摆力矩滑模控制器和附加转角滑模控制器,该方法具有较好的轨迹保持精度,减轻了一般滑模控制器计算产生的抖振现象,但滑动面仍存在奇异性的问题。文献[8-9]提出了基于积分终端的滑模控制器,消除了模型中不确定性的干扰,但收敛速度较慢。文献[10-11]在上层控制器设计中采用模糊滑模算法得到了附加横摆力矩,为削减积分滑模算法产生的抖振,采用模糊控制器进行优化,但收敛速度无法保证。文献[12-13]通过加入非奇异特性改进了终端滑模控制技术,能够避免滑模面的奇异性问题,但收敛速度仍较慢,不能快速有效地实现轨迹跟踪。以上控制策略均可在一定程度上提高车辆的操纵稳定性,但在减轻控制系统的抖振现象、滑模面的奇异性问题和保证系统的收敛速度等方面难以实现共同控制。

为解决上述问题,本文建立七自由度整车动力学模型、轮胎模型、轮毂电机模型,并确定合适的模型参数,提出一种基于直接横摆力矩控制的分层控制系统。基于自适应非奇异快速终端滑模(adaptive nonsingular fast terminal sliding mode, ANFTSM)控制计算方法设计上层控制器,采用二次规划优化算法设计下层控制器。通过改变参考模型输出的前轮转角和整车的实际速度,计算横摆角速度和质心侧偏角的理想值,由分布式电驱动整车模型计算得到横摆角速度和质心侧偏角的

实际值,将实际值与理想值的偏差作为上层控制器的优化目标函数,输出附加横摆力矩;下层控制器根据每个车轮的不同需求,将力矩进行优化分配。在不同工况下进行联合仿真,验证本文控制方案的控制效果。

1 车辆动力学模型

1.1 七自由度车辆动力学模型

分布式电驱动汽车的操纵稳定性主要决定于横摆角速度和质心侧偏角,研究重点是车辆平面运动特性,因此建立纵向、横向、横摆及4个车轮旋转运动的七自由度车辆动力学模型^[14],如图1所示。图中各变量的说明详见下文。

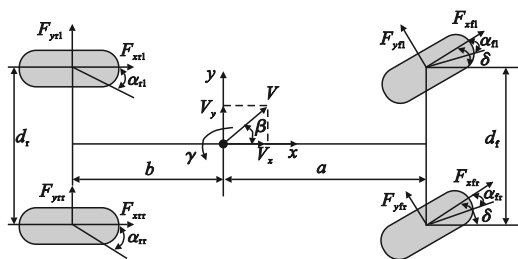


图1 七自由度车辆动力学模型

Fig. 1 Seven-degree-of-freedom vehicle dynamics model

进行如下合理假设:

- 1) 路面平坦,对车轮的垂直运动无影响,忽略路面动荷载引起的车轮运动;
- 2) 忽略空气阻力和斜坡阻力;
- 3) 忽略扭振、摆振等因素的影响;
- 4) 车辆转弯时,前轮转角相同。

纵向运动动力学方程为

$$m(\dot{V}_x - V_y \gamma) = (F_{xfl} + F_{xfr}) \cos \delta - (F_{yfl} + F_{yfr}) \sin \delta + F_{xrl} + F_{xrr} \quad (1)$$

侧向运动动力学方程为

$$m(\dot{V}_y + V_x \gamma) = (F_{xfl} + F_{xfr}) \sin \delta + (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos \delta + F_{yrl} + F_{yrr} \quad (2)$$

横摆运动动力学方程为

$$I_z \dot{\gamma} = a[(F_{xfl} + F_{xfr}) \sin \delta + (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos \delta] - b(F_{yrl} + F_{yrr}) + \frac{d_f}{2}[(F_{yfl} - F_{yfr}) \sin \delta - (F_{xfl} - F_{xfr}) \cos \delta] - (F_{xrl} - F_{xrr}) \frac{d_r}{2} + \Delta M_z w_{(t)} \quad (3)$$

式中: m 为整车质量; δ 为前轮转向角; γ 为车辆的横摆角速度; F_{yij} 为轮胎侧向力, F_{xij} 为轮胎纵向力,其中*i*代表前轴(用f表示)或后轴(用r表示),*j*代表左胎(用l表示)或右胎(用r表示); V_x 和 V_y

分别表示车辆速度 V 在 x 轴和 y 轴方向的分量; I_z 为车辆绕 z 轴的横摆转动惯量; a 和 b 分别表示车辆前轴和后轴到质心的距离; d_f 为前轮距; d_r 为后轮距; ΔM_z 是施加于重心的额外横摆力矩; $w_{(t)}$ 表示一个有界的集中扰动, 包括系统不确定性和外部扰动。图 1 中 α_{ij} 表示轮胎侧偏角。

车辆运动过程中轮胎上的垂直载荷受车辆运动状态的影响, 并在车轴之间传递。车轮上的垂向力计算表达式为

$$\begin{cases} F_{zfl} = \frac{1}{2}mg \frac{b}{L} - \frac{1}{2}ma_x \frac{h}{L} - ma_y \frac{b}{L} \frac{h}{d_f} \\ F_{zfr} = \frac{1}{2}mg \frac{b}{L} - \frac{1}{2}ma_x \frac{h}{L} + ma_y \frac{b}{L} \frac{h}{d_f} \\ F_{zrl} = \frac{1}{2}mg \frac{a}{L} + \frac{1}{2}ma_x \frac{h}{L} - ma_y \frac{b}{L} \frac{h}{d_r} \\ F_{zrr} = \frac{1}{2}mg \frac{a}{L} + \frac{1}{2}ma_x \frac{h}{L} + ma_y \frac{b}{L} \frac{h}{d_r} \end{cases} \quad (4)$$

式中: F_{zij} 表示轮胎垂向力; g 为重力加速度; h 为车辆质心高度; a_x 为纵向加速度; a_y 为侧向加速度; L 为轴距。

1.2 轮胎模型

采用魔术公式^[15]对轮胎进行非线性建模, 魔术公式精度高、易于使用, 特别适用于车辆动力学分析。轮胎模型的输入为纵向滑移率、侧偏角、车轮垂向载荷, 输出为轮胎所受的侧向力和纵向力。

魔术公式轮胎模型的数学表达式为

$$\begin{cases} Y_{(x)} = y_{(x)} + S_v \\ y_{(x)} = D \sin[\text{Carctan}(Bx - E \arctan(Bx))] \\ x = X + S_h \end{cases} \quad (5)$$

其中各类因子的计算式如下。

$$\begin{cases} C = a_0 \\ D = a_1 F_{zij}^2 + a_2 F_{zij} \\ B = \frac{a_3 \sin[a_4 \tan^{-1}(a_5 F_{zij})]}{C_y D_y} \\ E = a_6 F_{zij}^2 + a_7 F_{zij} + a_8 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $Y_{(x)}$ 表示汽车轮胎所受的侧向力或纵向力; X 表示轮胎的滑移率或侧偏角; x 表示水平偏移因子模型中的自变量; S_v 为 $y_{(x)}$ 曲线的竖直偏移; B 表示轮胎的刚度因子; C 表示 $y_{(x)}$ 曲线的形状因子; D 为峰值系数; E 为 $y_{(x)}$ 曲线的曲率因子, 反映 $y_{(x)}$ 曲线最大值附近的形状; S_h 为 $y_{(x)}$ 曲线的水平漂移; a_0, a_1, \dots, a_8 为魔术公式的拟合系数。

1.3 轮毂电机数学模型

由于电机响应速度远快于传统机械传动系统中车轮的响应速度, 将轮毂电机作为执行器应用

于车辆操纵稳定性控制系统中, 可更精确地调整驱动力或制动力, 以快速响应车辆动态变化, 提升操纵稳定性和安全性。本文采用等效简化模型, 以二阶传递函数表示电机实际输出转矩和理论输出转矩之间的关系^[16]。

2 上层控制器设计

滑模控制的基本思想是通过设计合适的切换函数和控制律, 使系统状态在有限时间内快速稳定地沿滑模面滑行并趋近目标值, 从而实现系统的控制目标, 为此需要选择一个滑动曲面。根据 ANFTSM 策略, 滑动面方程表示为

$$S = e + \lambda_1 |e|^{k_1} \text{sign}(e) + \lambda_2 |\dot{e}|^{k_2} \text{sign}(\dot{e}) \quad (7)$$

式中: S 表示滑模面的切换函数; e 为误差; λ_1, λ_2 为常数, $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0; k_1, k_2$ 为趋近速度参数, $1 < k_2 < 2, k_1 > k_2$ 。

e 定义式为

$$\begin{cases} e = (1 - \zeta)(\varphi - \varphi_d) + \zeta(\beta - \beta_d) \\ \dot{e} = (1 - \zeta)(\gamma - \gamma_d) + \zeta(\dot{\beta} - \dot{\beta}_d) \\ \ddot{e} = (1 - \zeta)(\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_d) + \zeta(\ddot{\beta} - \ddot{\beta}_d) \end{cases} \quad (8)$$

式中: ζ 为偏航角和侧滑角的权重因子; φ 为实际偏航角; φ_d 为理想偏航角; β 为实际质心侧偏角; β_d 为理想的质心侧偏角; γ_d 为理想的横摆角速度。

当有外界干扰时, 车辆的横摆运动方程为

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{I_z} [a(F_{zfl} + F_{zfr}) \sin\delta + a(F_{yfl} + F_{yfr}) \cos\delta - b(F_{yrl} + F_{yrr}) + \frac{d_f}{2}(F_{zfl} - F_{zfr}) \sin\delta + M_{zc} + w_{(t)}] \quad (9)$$

式中 M_{zc} 是控制器施加的横摆力矩。

M_{zc} 计算表达式为

$$M_{zc} = \frac{d_f}{2}(F_{yfr} - F_{yfl}) \cos\delta + (F_{yrr} - F_{yrl}) \frac{d_r}{2} \quad (10)$$

等效横摆力矩 M_{eq} 为

$$M_{eq} = \frac{I_z}{1 - \zeta} [(1 - \zeta)\dot{\gamma}_d - \zeta(\ddot{\beta} - \ddot{\beta}_d) - \frac{1}{k_2 \lambda_2} |\dot{e}|^{2 - \lambda_2} \text{sign}(\dot{e}) (1 + k_1 \lambda_1 |e|^{k_1 - 1})] \quad (11)$$

为减小不确定性和外部干扰对控制性能的影响, 采用自适应切换控制对系统不确定性进行评估, 切换鲁棒控制力矩 M_{saw} 计算表达式为

$$M_{saw} = \frac{I_z}{1 - \zeta} [-kS - (c_0 + c_1 |e| + c_2 |\dot{e}|) \cdot \text{sign}(S)] \quad (12)$$

式中: k 表示鲁棒控制器增益; $c_0、c_1、c_2$ 为正常数。

附加横摆力矩 ΔM_z 由等效控制力矩 M_{eq} 与切换鲁棒控制力矩 M_{saw} 组成,即

$$\Delta M_z = M_{eq} + M_{saw} \quad (13)$$

为减小 ANFTSM 控制中产生的抖振现象,采用饱和函数 $\text{sat}(S)$ 代替函数 $\text{sign}(S)$ 。

根据实际车辆的横摆角速度和质心侧偏角与期望值的偏差,由上层控制策略算法计算出期望的附加横摆力矩,并在 Simulink 中搭建上层控制策略模型,如图 2 所示。

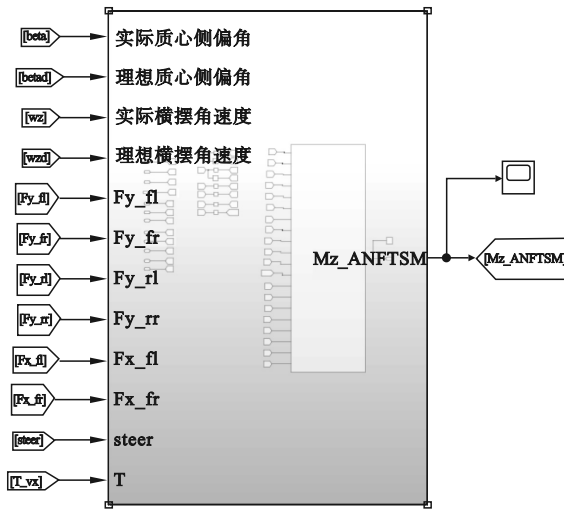


图 2 上层控制策略模型

Fig. 2 Upper-layer control strategy model

3 下层控制器设计

3.1 平均分配法

平均分配法是在保证车辆整体力矩平衡的前提下,将所需的总力矩或附加横摆力矩平均分配到各驱动电机上。该力矩分配策略比较简单,在某些复杂工况下可能达不到最优,但其为更复杂的优化分配方法提供了充足的理论基础。平均分配算法的分配策略如表 1 所示。

表 1 平均分配算法的分配策略

Table 1 Allocation strategy of the equalization algorithm

前轮转向角 δ/rad	横摆角速度偏差 $\Delta\gamma/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	转向特性	分配策略	
			左侧车轮	右侧车轮
$\delta > 0$	$\Delta\gamma > 0$	转向过度	增大	减小
$\delta > 0$	$\Delta\gamma < 0$	转向不足	减小	增大
$\delta < 0$	$\Delta\gamma > 0$	转向不足	增大	减小
$\delta < 0$	$\Delta\gamma < 0$	转向过度	减小	增大

采用平均分配算法控制力矩分配时,如车辆同侧车轮受到的分配力矩相等,基本不需要对车辆的操纵稳定性加以额外控制,车辆 4 个车轮的纵向驱动转矩表达式分别为

$$\begin{cases} T_{xfl} = \frac{T_x}{4} - \frac{\Delta M_z}{2d_f}r \\ T_{xfr} = \frac{T_x}{4} + \frac{\Delta M_z}{2d_f}r \\ T_{xrl} = \frac{T_x}{4} - \frac{\Delta M_z}{2d_f}r \\ T_{xrr} = \frac{T_x}{4} + \frac{\Delta M_z}{2d_f}r \end{cases} \quad (14)$$

式中: $T_{xfl}、T_{xfr}、T_{xrl}、T_{xrr}$ 分别表示左前轮、右前轮、左后轮、右后轮的驱动力矩; T_x 表示由速度跟随控制器得到的总驱动力矩; r 为车轮滚动半径。

电机输出转矩受电机转矩最大值 T_{max} 和路面附着系数 μ 的限制,轮毂电机输出转矩满足如下约束。

$$-\min(\mu F_{zij}r, T_{max}) \leq T_{xij} \leq \min(\mu F_{zij}r, T_{max}) \quad (15)$$

3.2 优化分配法

本文基于平均分配理论,对 4 个车轮的驱动转矩实时调整,进行优化分配。车辆转弯时,需要足够的横向力维持车辆转向的稳定,纵向力必须相应减小。这是因为轮胎与地面之间的总附着力有限,当横向力增加时,可用于产生纵向力的附着力就会减小。轮胎受地面附着力时纵向力与横向力间的约束公式为

$$\sqrt{F_{xij}^2 + F_{yij}^2} \leq \mu F_{zij}^2 \quad (16)$$

单个车轮的轮胎利用率 η_{ij} 为

$$\eta_{ij} = \frac{\sqrt{F_{xij}^2 + F_{yij}^2}}{\mu F_{zij}} \quad (17)$$

以 4 个车轮的轮胎利用率总和作为目标函数,由此得到下层控制器目标优化函数表达式为

$$J_{(\eta)} = \sum_{ij=fl,fr,rl,rr} c_{ij} \frac{F_{xij}^2 + F_{yij}^2}{\mu^2 F_{zij}^2} \quad (18)$$

式中: $J_{(\eta)}$ 表示整车轮胎的利用率总和; c_{ij} 表示各车轮的权重系数。

优化分配算法的约束条件如下。

1) 通过上层控制器计算输出的附加横摆力矩、车辆的总纵向力 F_x 和电机转矩应满足如下约束关系。

$$\begin{cases} F_x = \frac{1}{r}(T_{xfl} + T_{xfr} + T_{xrl} + T_{xrr}) \\ \Delta M_z = -\frac{d_f}{2}F_{xfl} + \frac{d_f}{2}F_{xfr} - \frac{d_r}{2}F_{xrl} + \frac{d_r}{2}F_{xrr} \end{cases} \quad (19)$$

2)将目标函数转化为二次规划问题,二次规划标准形式为

$$\begin{cases} \min J_{(\eta)} = \mathbf{q}^T \mathbf{W} \mathbf{q} \\ \text{s. t. } \mathbf{q}_{\min} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\max} \\ \mathbf{w} = \mathbf{A} \mathbf{q} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\mathbf{w} = [F_{xij} \quad \Delta M_z]^T$; $\mathbf{q} = [T_{xfl} \quad T_{xfr} \quad T_{xrl} \quad T_{xrr}]^T$;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ -\frac{d_f}{2} & \frac{d_f}{2} & -\frac{d_r}{2} & \frac{d_r}{2} \end{bmatrix}; \mathbf{W} = \text{diag} \left(\frac{1}{(\mu F_{zij})^2} \right)_{4 \times 4}。$$

以上二次规划问题可通过内点算法求解,得到各车轮的力矩分配结果,将上层控制器输出的期望附加横摆力矩作为优化目标函数,根据二次规划算法设计下层控制器。优化分配控制策略模型如图3所示。

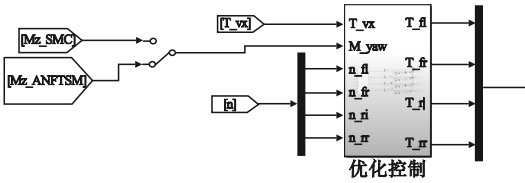


图3 下层分配控制策略模型

Fig.3 The lower level assigns the control strategy model

4 仿真结果及分析

为节约实验成本,降低实验风险,采用传统滑模控制算法和基于 ANFTSM 的控制算法设计不同控制策略,通过仿真实验得到横摆角速度和质心侧偏角,并与无控制的仿真结果及理想值进行对比分析。整车参数取值如表2所示。

4.1 正弦工况

正弦工况实验是通过给车辆施加一个正弦波形的转向输入来分析车辆的操纵稳定性。设置方向盘角度变化符合正弦波,如图4所示。仿真实验条件:车辆初始速度为40 km/h,路面附着系数为0.8。

图5所示为正弦工况下采用不同控制算法仿真得到的汽车质心侧偏角和横摆角速度响应结果。

表2 整车参数

Table 2 Vehicle parameters

参数名称	数值
整车质量 m/kg	1 230
横摆惯量 $I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1 343.1
整车质心高度 h/m	0.54
前轴轴距 a/m	1.04
后轴轴距 b/m	1.56
前轮轮距 d_f/m	1.480
后轮轮距 d_r/m	1.485
轮胎半径 r/m	0.3
车轮总成转动惯量 $J_w/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.8
前轴等效侧偏刚度 $k_f/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-57 760
后轴等效侧偏刚度 $k_r/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	-57 760

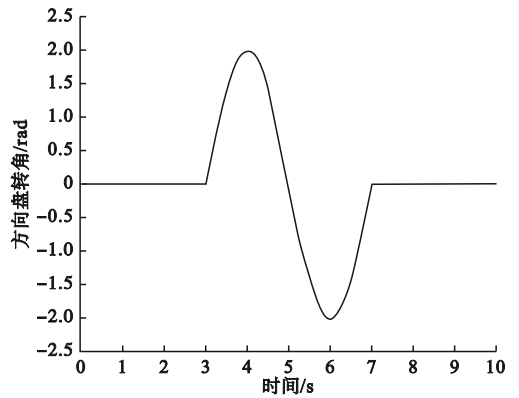
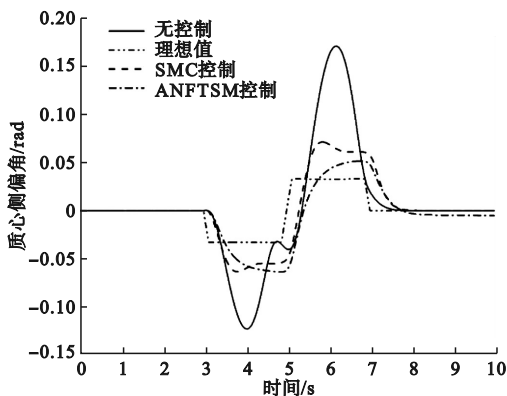


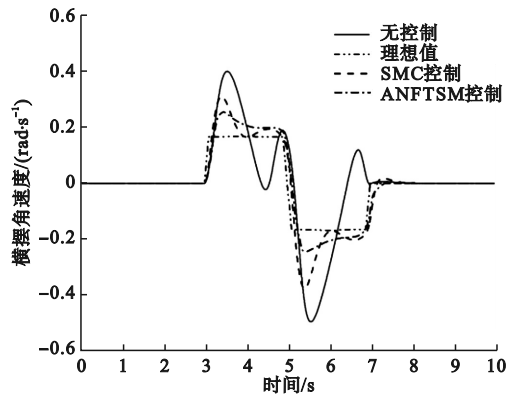
图4 正弦工况下方向盘角度变化

Fig.4 Change in steering wheel angle in sinusoidal mode

由图5(a)可见:不同控制算法下的质心侧偏角在3 s处均开始出现较大波动;无控制时质心侧偏角的波动最大,峰值为0.17 rad,ANFTSM控制时的质心侧偏角波动较小,其峰值比无控制时低0.14 rad,比传统 SMC 控制更接近理想值;ANFTSM控制器的质心侧偏角稳定在 $[-0.05, 0.05]$ 之间。由图5(b)可见:不同控制算法下的横摆角速度在3 s处亦开始出现较大波动;无控制时横摆角速度的最大值为0.4 rad/s,ANFTSM控制时的横摆角速度峰值比无控制时低0.2 rad/s,比传统 SMC 控制时低0.1 rad/s;ANFTSM控制时的横摆角速度稳定在 $[-0.22, 0.22]$ 之间。基于 ANFTSM 控制算法得到的车辆质心侧偏角和横摆角速度均能够快速跟随目标值并恢复平稳,从而保证车辆的操纵稳定性。



(a) 质心侧偏角



(b) 横摆角速度

图5 正弦工况下的响应结果

Fig. 5 Response results under sinusoidal condition

4.2 鱼钩工况

鱼钩试验也是用于评估汽车操纵稳定性的一种测试方法^[17],该方法模拟车辆在一侧两个车轮离开路面开到路肩上后,驾驶员在表现慌张情形下尽力使车辆回到正常行驶轨道的过程。鱼钩工况下方向盘角度变化如图6所示。仿真实验条件:车辆初始速度为60 km/h,路面附着系数为0.8。

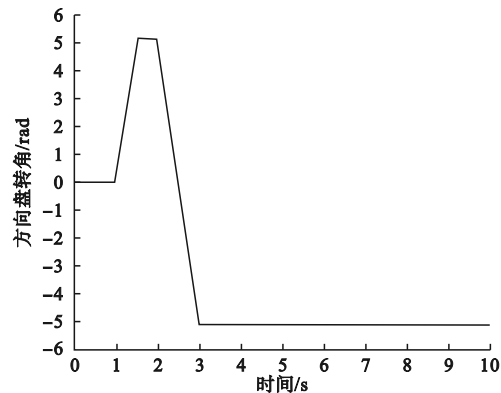
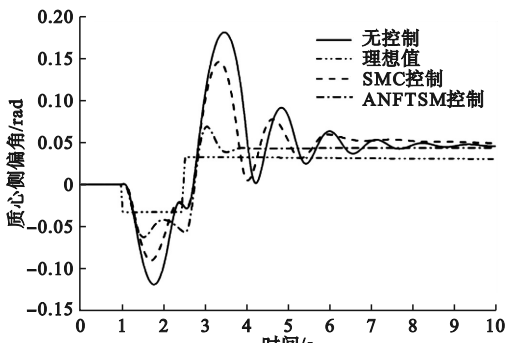


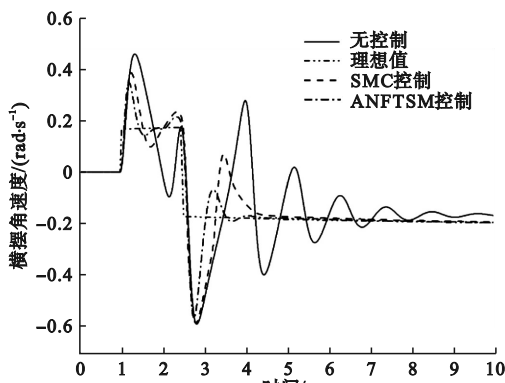
图6 鱼钩工况下方向盘角度变化

Fig. 6 The angle of the steering wheel changes in the fishhook condition

真得到的汽车质心侧偏角和横摆角速度响应结果。



(a) 质心侧偏角



(b) 横摆角速度

图7 鱼钩工况下的响应结果

Fig. 7 Response results under fishhook condition

由图7可见:不同控制算法下的质心侧偏角和横摆角速度在时间1 s处均开始出现波动;基于ANFTSM控制器的质心侧偏角波动最小,稳定在 $[-0.07, 0.07]$ 之间,并迅速收敛于理想值;ANFTSM控制时车辆横摆角速度的波动峰值较大,但在3.5 s后基本趋于稳定,而无控制和SMC控制时在3.5 s后依然有明显波动,ANFTSM控制时的横摆角速度稳定在 $[-0.05, 0.03]$ 之间。

综上,在正弦工况和鱼钩工况下的仿真结果表明,基于ANFTSM控制算法的分层控制器对于车辆操纵稳定性的控制性能优于传统的滑模控制。

5 结论

针对分布式电驱动汽车的操纵稳定性受到各类干扰产生的抖振问题,基于ANFTSM控制算法和二次规划算法,设计了ANFTSM控制器,解决了传统滑模控制器的奇异性,且加快了系统的收敛速度。仿真实验结果表明,与传统的滑模控制算法相比,基于ANFTSM控制的车辆在正弦工况和鱼钩工况下的质心侧偏角波动峰值分别降低了

图7所示为鱼钩工况下采用不同控制算法仿

5.25%和8.25%,横摆角速度波动峰值分别降低了21.5%和11.19%。本文提出的控制方法在不同工况下均可快速减小分布式电驱动汽车的横摆角速度和质心侧偏角与理想值的偏差,有效提高汽车的操纵稳定性。

参考文献 (References):

- [1] 许男,李小雨.复合工况下四轮驱动电动汽车操纵稳定性控制[J].机械工程学报,2021,57(8):205-220.
XU N,LI X Y. Handling and stability control of four-wheel drive electric vehicle under combined slip conditions [J]. Journal of Mechanical Engineering,2021,57(8):205-220. (in Chinese)
- [2] 夏长高,李亚洲.分布式驱动车辆直接横摆力矩与转向控制[J].重庆理工大学学报(自然科学),2024,38(4):31-38.
XIA C G,LI Y Z. Research on direct yaw moment and steering control of distributed drive vehicles [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science),2024,38(4):31-38. (in Chinese)
- [3] 冯樱,江子旺,乔宝山,等.极限工况下AFS与DYC可拓协调控制[J].机械设计与制造,2024(6):163-169.
FENG Y,JIANG Z W,QIAO B S,et al. AFS and DYC extension coordinated control under extreme condition [J]. Machinery Design & Manufacture,2024(6):163-169. (in Chinese)
- [4] 徐辉,徐志程,于凯.分布式电驱动汽车稳定性与能效优化控制[J].机械设计,2023,40(10):107-113.
XU H,XU Z C,YU K. Research on optimization of stability and energy efficiency for distributed electric vehicles [J]. Journal of Machine Design,2023,40(10):107-113. (in Chinese)
- [5] 华星淇,何锋.基于二阶滑模算法的双电机后驱车辆差速系统设计[J].机械设计与制造,2021(9):115-119,124.
HUA X Q,HE F. Design of dual motor rear drive vehicle differential system based on second order sliding mode algorithm [J]. Machinery Design & Manufacture,2021(9):115-119,124. (in Chinese)
- [6] 康庄,贾利民,秦勇.一种新的模糊滑模控制器设计方法[J].控制与决策,2024,39(6):1909-1917.
KANG Z,JIA L M,QIN Y. A new design method of fuzzy sliding mode controller [J]. Control and Decision,2024,39(6):1909-1917. (in Chinese)
- [7] 姜立标,吴中伟.基于趋近律滑模控制的智能车辆轨迹跟踪研究[J].农业机械学报,2018,49(3):381-386.
JIANG L B,WU Z W. Sliding mode control for intelligent vehicle trajectory tracking based on reaching law [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(3):381-386. (in Chinese)
- [8] 李子先,潘世举,徐友春.8轮分布式电驱动车辆AFS和DYC协同控制[J].汽车工程,2023,45(3):409-420.
LI Z X,PAN S J,XU Y C. Coordinated control of AFS and DYC for 8-wheel distributed electric drive vehicle [J]. Automotive Engineering,2023,45(3):409-420. (in Chinese)
- [9] 田韶鹏,蔡显雄,杨灿.分布式电驱动汽车横摆稳定性控制[J].江苏大学学报(自然科学版),2024,45(5):521-527,573.
TIAN S P,CAI X X,YANG C. Yaw stability control of distributed electric vehicle [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition),2024,45(5):521-527,573. (in Chinese)
- [10] 符立华,沈仙兵.一类轮式移动机器人的滑模轨迹跟踪控制研究[J].机械设计,2023,40(6):85-91.
FU L H,SHEN X B. Research on sliding mode trajectory tracking control of a kind of wheeled mobile robot [J]. Journal of Machine Design,2023,40(6):85-91. (in Chinese)
- [11] 邓斌,李维汉,吴迪,等.基于KFESO的四轮主动转向积分滑模控制[J].汽车工程,2024,46(1):100-108,119.
DENG B,LI W H,WU D,et al. Integral sliding mode control for four-wheel active steering based on Kalman filter extended state observer [J]. Automotive Engineering,2024,46(1):100-108,119. (in Chinese)
- [12] KONG X Y,ZHANG T. Non-singular fast terminal sliding mode control of high-speed train network system based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Symmetry,2020,12(2):205.
- [13] LI Z K,HUANG D Q,CAI L C. Adaptive nonsingular terminal sliding mode tracking control for high-speed trains with input constraints and parametric uncertainties [J]. International Journal of Control, Automation and Systems,2024,22(3):753-764.
- [14] 耿国歌,韦斌源,江浩斌,等.基于NA-EKF的分布式驱动电动汽车行驶状态估计研究[J].汽车工程,2018,40(7):770-776.
GENG G Q,WEI B Y,JIANG H B,et al. A research on driving state estimation for distributed drive electric vehicle based on NA-EKF [J]. Automotive Engineering,2018,40(7):770-776. (in Chinese)
- [15] 王先云,刘艳华,马斌,等.基于魔术公式的轮胎特征函数计算方法[J].科学技术与工程,2016,16(7):265-269.
WANG X Y,LIU Y H,MA B,et al. Tire characterizing function computation method based on magic formula [J]. Science Technology and Engineering,2016,16(7):265-269. (in Chinese)
- [16] JIN L Q,TIAN D Y,ZHANG Q X,et al. Optimal torque distribution control of multi-axle electric vehicles with in-wheel motors based on DDPG algorithm [J]. Energies,2020,13(6):1331.
- [17] 孙明,崔晓川,戴斌.美国NCAP鱼钩试验方法研究[J].北京汽车,2021(3):1-7.
SUN M,CUI X C,DAI Q. Research on fishhook test method of USA NCAP [J]. Beijing Automotive Engineering,2021(3):1-7. (in Chinese)

(责任编辑:宋颖韬)