

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202304132024101976

文章编号:1674-599X(2024)05-0127-09

引用格式:黄益绍,卞梦圆.基于反步滑模方法的车辆纵向自适应控制[J].交通科学与工程,2024,40(5):127-135.

Citation: HUANG Yishao, BIAN Mengyuan. Vehicle longitudinal adaptive control based on backstepping sliding mode method[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(5): 127-135.

基于反步滑模方法的车辆纵向自适应控制

黄益绍,卞梦圆

(长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:车辆纵向控制是自动驾驶研究的关键技术之一,建立了复杂的车辆纵向动力学模型,设计了合适的控制算法,并构造了控制器,提升了控制性能。首先,在考虑道路倾角、轮胎变形和车轮滑动等影响因素的基础上,建立了复杂的车辆纵向动力学模型;然后,综合运用自适应方法和反步滑模控制方法对所建模型设计控制器,并对控制系统的稳定性作了证明;最后,采用MATLAB/Simulink软件对控制系统进行仿真分析。研究表明:通过自适应反步滑模方法设计的控制器具有较好的稳定性,能够控制车辆以极小的误差以期望速度行驶。研究成果可为车辆自动驾驶及交通拥堵的缓解提供技术支撑。

关键词:车辆纵向控制;反步滑模方法;自适应控制;速度控制

中图分类号:U461.99

文献标志码:A

Vehicle longitudinal adaptive control based on backstepping sliding mode method

HUANG Yishao, BIAN Mengyuan

(School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology,
Changsha 410114, China)

Abstract: Vehicle longitudinal control is one of the key core technologies in autonomous driving research. This study established a complex vehicle longitudinal dynamics model, designed appropriate control algorithms, and constructed controllers, improving control performance. Firstly, a complex vehicle longitudinal dynamics model was established considering factors such as road inclination, tire deformation, and wheel slip. Then, the adaptive method and the backstepping sliding mode control method were used to design the controller for the model, and the stability of the control system was proved. Finally, MATLAB/Simulink was used for simulation analysis of the control system. The research results indicate that the controller designed with the adaptive backstepping sliding mode method has good stability and can control the vehicle to travel at the expected speed with a minimal error. The research results can provide technical support for autonomous driving and alleviation of traffic congestion.

Key words: vehicle longitudinal control; backstepping sliding mode method; adaptive control; speed control

随着我国车辆数量的不断增加,交通拥堵问题日趋严重,直接影响了居民的出行质量和城市发

展^[1],而智能化车辆已经逐渐进入人们的生活当中。车辆的纵向控制是车辆自动驾驶的基础^[2],主要通

收稿日期:2023-04-13

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2022JJ30619)

通信作者:黄益绍(1976—),男,副教授,主要从事交通信息控制等方面的研究工作。E-mail:744861302@qq.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

过车外雷达感知车辆环境及参数,并将其传递到控制器中,通过控制算法计算所需车轮扭矩等参数来实现车辆的速度控制。通过车辆的纵向速度控制可以实现车辆跟随、自适应巡航和车队保持等。在常见的信号灯交叉口的车辆起步和通过问题中,通过纵向控制可以使车辆同时起步,这将大大缩短车辆起步时间,减小起步间距,增大绿灯时间内的车流量,提高交通效率^[3],缓解交通压力。

车辆纵向控制主要分为两部分,一是建立所需控制模型,二是选择控制方法设计控制器。有学者对控制模型进行研究并设计了控制器,如SHEIKHOESLAM等^[4]就对简化后的非线性车辆动力学模型进行了纵向控制研究,针对车辆排队较长工况开发了一种控制律;刘贺^[5]在考虑驾驶员驾驶风格的基础上进行了车辆纵向控制研究;王韬等^[6]建立了离散形式的纵向动力学模型,并将控制优化问题转化为拉格朗日对偶问题,开发了一款快速求解器,实现了模型的预测控制。在控制方法方面,学者们更多采用的是模糊控制、模型预测控制、比例-积分-微分(proportion-integral-differential, PID)控制等,或将这几种控制方法结合起来。李以农等^[7]采用模糊PID方法进行车辆的纵向控制,对PID的3个参数通过参数自整定方法进行调节,来控制车辆的纵向速度;谯艳娟等^[8]对车辆纵向控制中的制动控制系统作了理论上的阐述;李广南等^[9]在模型预测控制方法中加入了一种改进的粒子群优化算法来处理车辆纵向控制中的速度跟踪精度问题,该算法提高了控制精度;ECKSTEIN等^[10]对考虑最小能耗的模型预测控制器和考虑控制器实用性的模型预测控制器进行了比较研究;江浩斌等^[11]将模型预测控制、滑模控制和无模型自适应控制算法相结合来处理车辆纵向动力学控制问题;王靖岳等^[12]针对车辆纵向速度控制问题设计了上层采用模型预测控制,下层采用模糊PID控制的分层式控制器。

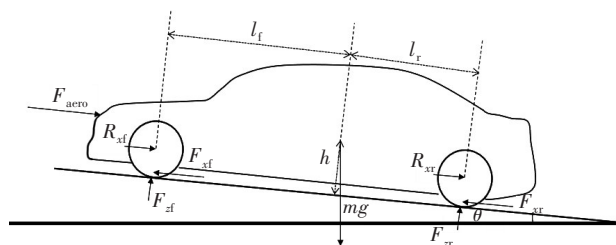
考虑到车辆纵向控制模型的非线性和复杂性,大部分学者在纵向动力学建模时都进行了较多简化,忽略了道路坡度、车轮滑动和轮胎形变等因素的影响。但行驶车辆受很多外力影响,更加精确的模型才能更好地反映车辆在实际运动时的情况。同时,在车辆纵向控制问题中更多学者采用了模型预测控制、PID控制和模糊控制等方法。自适应反步滑模方法^[13]作为一种处理复杂非线性系统控制问题的方法,具有良好的自适应性、鲁棒性和全局

稳定性,并能克服快速变化的参数不确定性,常用在飞行器^[14-15]、电力系统^[16]和水中航行器^[17-18]的控制中,而用在车辆纵向控制中的研究较少。鉴于此,本研究将采用反步滑模方法对本研究所建立的精确车辆纵向控制模型进行控制器设计及分析。

1 车辆纵向运动模型

1.1 车辆模型

车辆在行驶过程中会受到道路倾角、空气阻力和滚动阻力等因素的影响,在建立车辆纵向运动模型时,要尽可能地考虑到各种因素。车辆纵向运动模型如图1所示。



注: θ 为道路的倾角; m 为车辆质量; h 为车辆重心高度; l_f 和 l_r 分别为前后桥到车辆重心的距离, $l_f + l_r = l$ (l 为车辆前桥到后桥的距离); F_{aero} 为车辆所受空气阻力; R_{xf} 和 R_{xr} 分别为前后轮滚动阻力; F_{zf} 和 F_{zr} 分别为前后轮轮胎法向力; F_{xf} 和 F_{xr} 分别为前后轮轮胎纵向力。

图1 车辆纵向运动模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vehicle longitudinal motion model

1.1.1 空气阻力 F_{aero}

车辆在行驶过程中所产生的空气阻力与空气密度、空气阻力系数、车辆迎风面面积和风速等因素有关,空气阻力 F_{aero} 可以表示为:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_d A_f (V_x + V_{wind})^2 \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; C_d 为空气阻力系数,一般取 0.28 ~ 0.40; A_f 为车辆迎风面面积,一般为车辆纵向投影面积的 79% ~ 84%; V_x 为车辆的纵向速度; V_{wind} 为风速,由于车速远大于风速,通常忽略。

1.1.2 滚动阻力 R_{xf} 和 R_{xr}

车辆在行驶过程中轮胎会变形与复原。在复原过程中,作用在轮胎上的能量并未被全部收回,而是产生了阻碍车辆运动的滚动阻力,滚动阻力与其相应的法向力成一定的比例关系,可以表示为:

$$\begin{cases} R_{xf} = \mu_f F_{zf} \\ R_{xr} = \mu_r F_{zr} \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ_f 、 μ_r 分别为前后轮的滚动阻力系数。

1.1.3 轮胎法向力 F_{zf} 和 F_{zr}

通过分析前后轮的力矩平衡方程可以得到前后轮法向力的表达式,前后轮的力矩平衡方程为:

$$\begin{cases} F_{zf}l + F_{aero}h + m\dot{V}_x h + mgh \sin \theta - mgl_r \cos \theta = 0 \\ F_{zr}l - F_{aero}h - m\dot{V}_x h - mgh \sin \theta - mgl_r \cos \theta = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

通过式(3)可得到前后轮法向力分别为:

$$\begin{cases} F_{zf} = \frac{1}{l} (-F_{aero}h - m\dot{V}_x h - mgh \sin \theta + mgl_r \cos \theta) \\ F_{zr} = \frac{1}{l} (F_{aero}h + m\dot{V}_x h + mgh \sin \theta + mgl_r \cos \theta) \end{cases} \quad (4)$$

1.1.4 轮胎纵向力 F_{xf} 和 F_{xr}

在轮胎滑动率较小时,轮胎纵向力滑移曲线可以近似为直线:

$$F_{xi} = C_\lambda \lambda \quad (5)$$

式中: C_λ 为轮胎的纵向刚度, λ 可表示为:

$$\lambda = \begin{cases} \frac{\omega R_{ei} - V_x}{\omega R_{ei}}, & \lambda > 0 \text{ (车辆驱动)} \\ \frac{\omega R_{ei} - V_x}{V_x}, & \lambda \leq 0 \text{ (车辆制动)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ω 为车轮旋转角速度; R_{ei} 为车轮的有效半径,当*i*为*f*时表示前轮,当*i*为*r*时表示后轮。

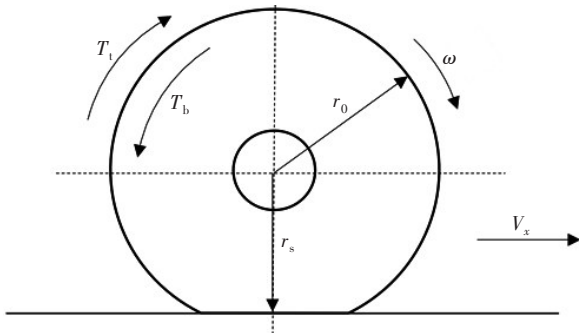
1.1.5 整车纵向受力分析

通过分析整车的纵向受力^[19],可得到:

$$m\dot{V}_x = F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xf} - R_{xr} - mg \sin \theta \quad (7)$$

1.2 轮胎模型

由于车辆的重力,轮胎在接触地面后会产生形变,如图2所示,此时轮胎的半径可用有效半径 R_{ei} 来表示,有效半径在车辆系统动力学中起着重要的作用。



注: T_f 为驱动时的车轮扭矩; T_b 为制动时的车轮扭矩; r_0 为轮胎未变形半径; r_s 为轮胎静载半径。

图2 轮胎示意图

Fig.2 Tire diagram

前后轮的有效半径^[19]可表示为:

$$R_{ei} = \frac{r_0 \sin \left(\arccos \left(\frac{r_0 - \frac{F_{zi}}{k_z}}{r_0} \right) \right)}{\arccos \left(\frac{r_0 - \frac{F_{zi}}{k_z}}{r_0} \right)} \quad (8)$$

式中: k_z 为轮胎的垂向刚度。

根据车轮转动时的力矩平衡关系,可得到轮胎的动态特性方程:

$$J\dot{\omega} = T_t - T_b - F_x R - F_i \quad (9)$$

由于轮胎纵向力在车辆驱动和制动时具有不同的表达式,所以把轮胎的动态特性方程分为驱动时的动态方程和制动时的动态方程。驱动时的动态方程为:

$$J_t \dot{\omega} = T_t - F_{xf} R_{ef} - F_{xr} R_{er} - F_1 \quad (10)$$

制动时的动态方程为:

$$J_b \dot{\omega} = T_b - F_{xf} R_{ef} - F_{xr} R_{er} - F_2 \quad (11)$$

式中: J_t 、 J_b 分别为驱动时和制动时轮胎的转动惯量; F_1 、 F_2 分别为驱动时和制动时的车轮扰动,均为未知常量。

结合式(7)和式(10)~(11)可得到驱动时和制动时车辆的纵向动力学模型,分别为:

$$\begin{cases} \dot{V}_x = \frac{1}{m} (F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xf} - R_{xr} - mg \sin \theta) \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J_t} (T_t - F_{xf} R_{ef} - F_{xr} R_{er} - F_1) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_x = \frac{1}{m} (F_{xf} + F_{xr} - F_{aero} - R_{xf} - R_{xr} - mg \sin \theta) \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J_b} (T_b - F_{xf} R_{ef} - F_{xr} R_{er} - F_2) \end{cases} \quad (13)$$

2 控制器设计

2.1 驱动控制器设计

将式(2)~(6)中的驱动系统控制部分代入式(12)中,可将驱动模型简化为:

$$\begin{cases} \dot{V}_x = f_{10} \frac{1}{\omega} + f_{11} + f_{12} \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J_t} (T_t + f_{13} - F_1) \end{cases} \quad (14)$$

其中,

$$\begin{cases} f_{10} = -\frac{C_\lambda}{m} \left(\frac{V_x}{R_{ef}} + \frac{V_x}{R_{er}} \right) \\ f_{11} = -\frac{F_{aero}}{m} + \frac{h}{ml} (F_{aero} + m\dot{V}_x)(\mu_f - \mu_r) \\ f_{12} = \frac{2C_\lambda}{m} + gh \sin \theta \frac{\mu_f - \mu_r}{l} - \\ \quad g \cos \theta \frac{\mu_f l_r + \mu_r l_f}{l} - g \sin \theta \\ f_{13} = -C_\lambda (R_{ef} + R_{er}) + 2C_\lambda V_x \frac{1}{\omega} \end{cases} \quad (15)$$

定义跟踪误差为:

$$z_{11} = V_x - V_{xd} \quad (16)$$

式中: V_{xd} 为期望车速。

跟踪误差的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{z}_{11} &= \dot{V}_x - \dot{V}_{xd} \\ &= f_{10} \frac{1}{\omega} + f_{11} + f_{12} - \dot{V}_{xd} \end{aligned} \quad (17)$$

定义稳定项为:

$$\alpha_1 = k_{11} z_{11} \quad (18)$$

式中: $k_{11} > 0$, 且为常数。

选择 Lyapunov 函数

$$V_{11} = \frac{1}{2} z_{11}^2 \quad (19)$$

定义

$$\begin{aligned} z_{12} &= \dot{z}_{11} + \alpha_1 \\ &= f_{10} \frac{1}{\omega} + f_{11} + f_{12} - \dot{V}_{xd} + \alpha_1 \end{aligned} \quad (20)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}_{11} &= z_{11} \dot{z}_{11} \\ &= z_{11} (z_{12} - \alpha_1) \\ &= z_{11} z_{12} - k_{11} z_{11}^2 \end{aligned} \quad (21)$$

z_{12} 的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{z}_{12} &= \ddot{z}_{11} + \dot{\alpha}_1 \\ &= \dot{f}_{10} \frac{1}{\omega} - f_{10} \frac{1}{\omega^2} \dot{\omega} + \dot{f}_{11} - \ddot{V}_{xd} + \dot{\alpha}_1 \\ &= \dot{f}_{10} \frac{1}{\omega} - f_{10} \frac{1}{\omega^2} \frac{1}{J_1} (T_1 + f_{13} - F_1) + \\ &\quad \dot{f}_{11} - \ddot{V}_{xd} + \dot{\alpha}_1 \end{aligned} \quad (22)$$

选择 Lyapunov 函数

$$V_{12} = V_{11} + \frac{1}{2} \sigma_1^2 \quad (23)$$

式中: σ_1 为切换函数, 其表达式为:

$$\sigma_1 = k_{12} z_{11} + z_{12} \quad (24)$$

其中, $k_{12} > 0$ 且为常数。则有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{12} &= \dot{V}_{11} + \sigma_1 \dot{\sigma}_1 \\ &= z_{11} z_{12} - k_{11} z_{11}^2 + \sigma_1 \dot{\sigma}_1 \\ &= z_{11} z_{12} - k_{11} z_{11}^2 + \sigma_1 (k_{12} \dot{z}_{11} + \dot{z}_{12}) \\ &= z_{11} z_{12} - k_{11} z_{11}^2 + \sigma_1 [k_{12} (z_{12} - k_{11} z_{11}) + \dot{f}_{10} \frac{1}{\omega} - \\ &\quad f_{10} \frac{1}{\omega^2} \frac{1}{J_1} (T_1 + f_{13} - F_1) + \dot{f}_{11} - \ddot{V}_{xd} + \dot{\alpha}_1] \end{aligned} \quad (25)$$

设计驱动控制器为:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{\omega^2 J_1}{f_{10}} [h_1 \sigma_1 + h_1 \beta_1 \operatorname{sgn}(\sigma_1) - F_1 + \bar{F}_1 \operatorname{sgn}(\sigma_1) + \\ &\quad k_{12} (z_{12} - k_{11} z_{11}) + \dot{f}_{10} \frac{1}{\omega} + \dot{f}_{11} - \ddot{V}_{xd} + \dot{\alpha}_1] - \\ &\quad f_{13} + F_1 \end{aligned} \quad (26)$$

式中: h_1 和 β_1 为正常数; \bar{F}_1 为 F_1 的上界。

F_1 未知易造成跟踪误差 z_{11} 抖动, 因此采用自适应算法对其进行估计。定义 \tilde{F}_1 为 F_1 的估计误差, 则有:

$$\tilde{F}_1 = F_1 - \hat{F}_1 \quad (27)$$

式中: \hat{F}_1 为 F_1 的估计值, 且 $\dot{\tilde{F}}_1 = -\dot{\hat{F}}_1$ 。

选择 Lyapunov 函数

$$V_{13} = V_{12} + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{F}_1^2 \quad (28)$$

式中: γ_1 为一个正常数。

V_{13} 的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{13} &= \dot{V}_{12} - \frac{1}{\gamma_1} \tilde{F}_1 \dot{\tilde{F}}_1 \\ &= z_{11} z_{12} - k_{11} z_{11}^2 + \sigma_1 [k_{12} (z_{12} - k_{11} z_{11}) + \dot{f}_{10} \frac{1}{\omega} - \\ &\quad f_{10} \frac{1}{\omega^2} \frac{1}{J_1} (T_1 + f_{13} - F_1) + \dot{f}_{11} - \ddot{V}_{xd} + \dot{\alpha}_1] - \\ &\quad \frac{1}{\gamma_1} \tilde{F}_1 \dot{\tilde{F}}_1 \\ &= z_{11} z_{12} - k_{11} z_{11}^2 + \sigma_1 [k_{12} (z_{12} - k_{11} z_{11}) + \dot{f}_{10} \frac{1}{\omega} - \\ &\quad f_{10} \frac{1}{\omega^2} \frac{1}{J_1} (T_1 + f_{13} - \hat{F}_1) + \dot{f}_{11} - \ddot{V}_{xd} + \dot{\alpha}_1] - \\ &\quad \frac{1}{\gamma_1} \tilde{F}_1 (\dot{\hat{F}}_1 - \frac{\gamma_1 f_{10}}{\omega^2 J_1}) \end{aligned} \quad (29)$$

设计驱动系统自适应控制器为:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{\omega^2 J_1}{f_{10}} [k_{12} (z_{12} - k_{11} z_{11}) + \dot{f}_{10} \frac{1}{\omega} + \dot{f}_{11} \\ &\quad - \ddot{V}_{xd} + \dot{\alpha}_1 + h_1 \sigma_1 + h_1 \beta_1 \operatorname{sgn}(\sigma_1)] - f_{13} + \hat{F}_1 \end{aligned} \quad (30)$$

自适应律为:

$$\dot{\hat{F}}_1 = \frac{\gamma_1 f_{i0}}{\omega^2 J_1} \quad (31)$$

2.2 制动控制器设计

将式(2)~(6)中的制动控制系统部分代入式(13)中,可将制动模型简化为:

$$\begin{cases} \dot{V}_x = f_{b0}\omega + f_{b1} + f_{b2} \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J_b}(T_b + f_{b3} - F_2) \end{cases} \quad (32)$$

其中,

$$\begin{cases} f_{b0} = \frac{C_\lambda}{mV_x}(R_{ef} + R_{er}) \\ f_{b1} = \frac{F_{aero}}{m} + \frac{h}{ml}(F_{aero} + m\dot{V}_x)(\mu_l - \mu_r) \\ f_{b2} = \frac{2C_\lambda}{m} + \frac{\mu_l - \mu_r}{l}gh \sin \theta \\ \quad - g \cos \theta \frac{\mu_l l_r + \mu_r l_f}{l} - g \sin \theta \\ f_{b3} = -C_\lambda \left[\frac{\omega}{V_x}(R_{ef}^2 + R_{er}^2) - (R_{ef} + R_{er}) \right] \end{cases} \quad (33)$$

定义跟踪误差为:

$$z_{b1} = V_x - V_{xd} \quad (34)$$

跟踪误差的导数为:

$$\dot{z}_{b1} = \dot{V}_x - \dot{V}_{xd} = f_{b0}\omega + f_{b1} + f_{b2} - \dot{V}_{xd} \quad (35)$$

定义稳定项为:

$$\alpha_b = k_{b1} z_{b1} \quad (36)$$

式中: $k_{b1}>0$,且为常数。

选择 Lyapunov 函数

$$V_{b1} = \frac{1}{2} z_{b1}^2 \quad (37)$$

定义

$$z_{b2} = \dot{z}_{b1} + \alpha_b = f_{b0}\omega + f_{b1} + f_{b2} - \dot{V}_{xd} + \alpha_b \quad (38)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}_{b1} &= z_{b1} \dot{z}_{b1} \\ &= z_{b1}(z_{b2} - \alpha_b) \\ &= z_{b1} z_{b2} - k_{b1} z_{b1}^2 \end{aligned} \quad (39)$$

z_{b2} 的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{z}_{b2} &= \ddot{z}_{b1} + \dot{\alpha}_b \\ &= \dot{f}_{b0}\omega + f_{b0}\dot{\omega} + \dot{f}_{b1} - \ddot{V}_{xd} + \dot{\alpha}_b \\ &= \dot{f}_{b0}\omega + f_{b0} \frac{1}{J_b}(T_b + f_{b3} - F_2) + \dot{f}_{b1} - \ddot{V}_{xd} + \dot{\alpha}_b \end{aligned} \quad (40)$$

选择 Lyapunov 函数

$$V_{b2} = V_{b1} + \frac{1}{2} \sigma_b^2 \quad (41)$$

式中: σ_b 为切换函数,其表达式为:

$$\sigma_b = k_{b2} z_{b1} + z_{b2} \quad (42)$$

其中, $k_{b2}>0$ 且为常数。则有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{b2} &= \dot{V}_{b1} + \sigma_b \dot{\sigma}_b \\ &= z_{b1} z_{b2} - k_{b1} z_{b1}^2 + \sigma_b \dot{\sigma}_b \\ &= z_{b1} z_{b2} - k_{b1} z_{b1}^2 + \sigma_b (k_{b2} \dot{z}_{b1} + \dot{z}_{b2}) \\ &= z_{b1} z_{b2} - k_{b1} z_{b1}^2 + \sigma_b [k_{b2}(z_{b2} - k_{b1} z_{b1}) + \dot{f}_{b0}\omega + \\ &\quad f_{i0} \frac{1}{J_b}(T_b + f_{b3} - F_2) + \dot{f}_{b1} - \ddot{V}_{xd} + \dot{\alpha}_b] \end{aligned} \quad (43)$$

设计制动控制器为:

$$\begin{aligned} T_b = \frac{J_b}{f_{b0}} [-k_{b2}(z_{b2} - k_{b1} z_{b1}) - \dot{f}_{b0}\omega - \dot{f}_{b1} + \ddot{V}_{xd} - \\ \dot{\alpha}_b - h_b \sigma_b - h_b \beta_b \operatorname{sgn}(\sigma_b) + F_2 - \bar{F}_2 \operatorname{sgn}(\sigma_b)] - \\ f_{b3} + F_2 \end{aligned} \quad (44)$$

式中: h_b 和 β_b 为正常数; \bar{F}_2 为 F_2 的上界。

F_2 未知易造成跟踪误差 z_{b2} 抖动,同样采用自适应算法对其进行估计。

定义 \tilde{F}_2 为 F_2 的估计误差,则有:

$$\tilde{F}_2 = F_2 - \hat{F}_2 \quad (45)$$

式中: \hat{F}_2 为 F_2 的估计值,且 $\dot{\tilde{F}}_2 = -\dot{\hat{F}}_2$ 。

选择 Lyapunov 函数

$$V_{b3} = V_{b2} + \frac{1}{2\gamma_b} \tilde{F}_2^2 \quad (46)$$

式中: γ_b 为一个正常数。

V_{b3} 的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{b3} &= \dot{V}_{b2} - \frac{1}{\gamma_b} \tilde{F}_2 \dot{\tilde{F}}_2 \\ &= z_{b1} z_{b2} - k_{b1} z_{b1}^2 + \sigma_b [k_{b2}(z_{b2} - k_{b1} z_{b1}) + \dot{f}_{b0}\omega + \\ &\quad f_{i0} \frac{1}{J_b}(T_b + f_{b3} - F_2) + \dot{f}_{b1} - \ddot{V}_{xd} + \dot{\alpha}_b] - \frac{1}{\gamma_b} \tilde{F}_2 \dot{\tilde{F}}_2 \\ &= z_{b1} z_{b2} - k_{b1} z_{b1}^2 + \sigma_b [k_{b2}(z_{b2} - k_{b1} z_{b1}) + \dot{f}_{b0}\omega \\ &\quad + f_{i0} \frac{1}{J_b}(T_b + f_{b3} - \hat{F}_2) + \dot{f}_{b1} - \ddot{V}_{xd} + \dot{\alpha}_b] \\ &\quad - \frac{1}{\gamma_b} \tilde{F}_2 (\dot{\tilde{F}}_2 - \frac{\gamma_b f_{i0}}{J_b}) \end{aligned} \quad (47)$$

设计制动系统自适应控制器为:

$$\begin{aligned} T_b = \frac{J_b}{f_{b0}} [-k_{b2}(z_{b2} - k_{b1} z_{b1}) - \dot{f}_{b0}\omega - \dot{f}_{b1} + \\ \ddot{V}_{xd} - \dot{\alpha}_b - h_b \sigma_b - h_b \beta_b \operatorname{sgn}(\sigma_b)] - f_{b3} + \hat{F}_2 \end{aligned} \quad (48)$$

自适应律为:

$$\dot{\hat{F}}_2 = \frac{\gamma_b f_{i0}}{J_b} \quad (49)$$

2.3 稳定性证明

2.3.1 驱动控制器稳定性证明

证明:将驱动控制器式(30)和自适应律式(31)代入式(29)得:

$$\dot{V}_{i3} = z_{i1}z_{i2} - k_{i1}z_{i1}^2 - h_i\sigma_i^2 - h_i\beta_i|\sigma_i| \quad (50)$$

$$z_i^T = [z_{i1} \quad z_{i2}], Q_i = \begin{bmatrix} k_{i1} + h_i k_{i2}^2 & h_i k_{i2} - \frac{1}{2} \\ h_i k_{i2} - \frac{1}{2} & h_i \end{bmatrix}, \text{得:}$$

$$\begin{aligned} z_i^T Q_i z_i &= [z_{i1} \quad z_{i2}] \begin{bmatrix} k_{i1} + h_i k_{i2}^2 & h_i k_{i2} - \frac{1}{2} \\ h_i k_{i2} - \frac{1}{2} & h_i \end{bmatrix} [z_{i1} \quad z_{i2}]^T \\ &= k_{i1}z_{i1}^2 + h_i k_{i2}^2 z_{i1}^2 + 2h_i k_{i2} z_{i1} z_{i2} - z_{i1} z_{i2} + h_i z_{i2}^2 \\ &= k_{i1}z_{i1}^2 - z_{i1} z_{i2} + h_i \sigma_i^2 \end{aligned} \quad (51)$$

此时

$$\dot{V}_{i3} = -z_i^T Q_i z_i - h_i \beta_i |\sigma_i| \quad (52)$$

$$\begin{aligned} |Q_i| &= h_i(k_{i1} + h_i k_{i2}^2) - (h_i k_{i2} - \frac{1}{2})^2 \\ &= h_i(k_{i1} + k_{i2}) - \frac{1}{4} \end{aligned} \quad (53)$$

通过选取 h_i, k_{i1}, k_{i2} 的值,可使 $|Q_i| > 0$,保证 Q_i 为正定矩阵,从而保证 $\dot{V}_{i3} = -z_i^T Q_i z_i - h_i \beta_i |\sigma_i| \leq 0$,进而使得驱动系统式(29)在驱动控制器式(30)和自适应律式(31)的控制下处于稳定状态。

2.3.2 制动控制器稳定性证明

证明:将制动控制器式(48)和自适应律式(49)代入式(47)得:

$$\dot{V}_{b3} = z_{b1}z_{b2} - k_{b1}z_{b1}^2 - h_b\sigma_b^2 - h_b\beta_b|\sigma_b| \quad (54)$$

$$\text{取 } z_b^T = [z_{b1} \quad z_{b2}], Q_b = \begin{bmatrix} k_{b1} + h_b k_{b2}^2 & h_b k_{b2} - \frac{1}{2} \\ h_b k_{b2} - \frac{1}{2} & h_b \end{bmatrix},$$

可得:

$$\begin{aligned} z_b^T Q_b z_b &= [z_{b1} \quad z_{b2}] \begin{bmatrix} k_{b1} + h_b k_{b2}^2 & h_b k_{b2} - \frac{1}{2} \\ h_b k_{b2} - \frac{1}{2} & h_b \end{bmatrix} [z_{b1} \quad z_{b2}]^T \\ &= k_{b1}z_{b1}^2 + h_b k_{b2}^2 z_{b1}^2 + 2h_b k_{b2} z_{b1} z_{b2} - z_{b1} z_{b2} + h_b z_{b2}^2 \\ &= k_{b1}z_{b1}^2 - z_{b1} z_{b2} + h_b \sigma_b^2 \end{aligned} \quad (55)$$

此时

$$\dot{V}_{b3} = -z_b^T Q_b z_b - h_b \beta_b |\sigma_b| \quad (56)$$

$$\begin{aligned} |Q_b| &= h_b(k_{b1} + h_b k_{b2}^2) - (h_b k_{b2} - \frac{1}{2})^2 \\ &= h_b(k_{b1} + k_{b2}) - \frac{1}{4} \end{aligned} \quad (57)$$

通过选取 h_b, k_{b1}, k_{b2} 的值,可使 $|Q_b| > 0$,保证 Q_b 为正定矩阵,从而保证 $\dot{V}_{b3} = -z_b^T Q_b z_b - h_b \beta_b |\sigma_b| \leq 0$,进而使得制动系统式(47)在制动控制器式(48)和自适应律式(49)的控制下处于稳定状态。

3 仿真与分析

本研究的控制目标为车辆通过所设计的控制器控制车轮的扭矩,从而使得车辆可以按照期望速度行驶。采用MATLAB/Simulink软件^[20]建立本研究控制系统的仿真模型,并对所设计的控制器进行仿真分析,仿真模型如图3所示。车辆各参数见表1。

本研究只考虑车辆行驶在直线道路上,忽略弯道影响,用一段函数计算被控制车辆的期望速度(包含加速、匀速、减速三个阶段),仿真时间共50s,在0~20s内车辆通过两段加速运动至最大速度35m/s,之后进行10s的匀速运动,在最后20s内车辆减速至0m/s。期望速度的函数表达式为:

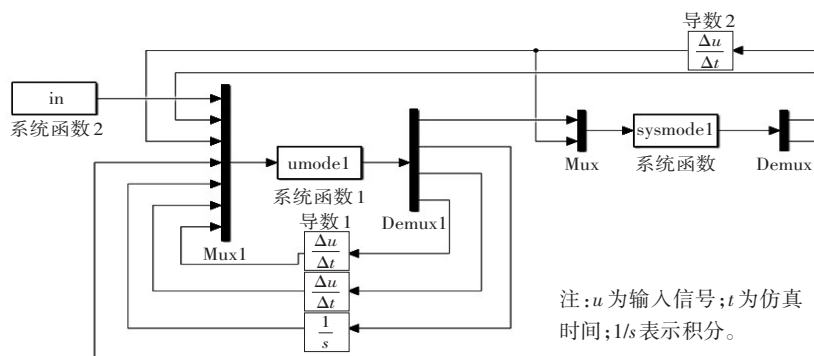


图3 Simulink仿真模型图

Fig. 3 Simulink simulation model diagram

$$V_{\text{sd}} = \begin{cases} 2t, & 0 \leq t < 15 \\ t + 15, & 15 \leq t < 20 \\ 35, & 20 \leq t < 30 \\ -\frac{7}{4}t + \frac{175}{2}, & 30 \leq t \leq 50 \end{cases} \quad (58)$$

调节自适应反步滑模控制器的系数使控制器达到较好的控制效果。其中,驱动控制器系数 h_1 、 k_{11} 、 k_{12} 应满足 $h_1(k_{11} + k_{12}) > 1/4$,驱动控制器系数的取值为 $k_{11}=k_{12}=h_1=\beta_1=\gamma_1=80$,制动控制器的系数 h_b 、 k_{b1} 、 k_{b2} 应满足 $h_b(k_{b1} + k_{b2}) > 1/4$,驱动控制器系数的取值为 $k_{b1}=k_{b2}=h_b=\beta_b=\gamma_b=80$,经过50 s的仿真,结果如图4~7所示。

表1 车辆各参数含义及取值

Table 1 Meaning and value of each parameter

参数符号	参数含义	取值
m	车辆质量	1 370 kg
g	重力加速度	9.8 m/s ²
C_A	轮胎纵向刚度	268 kN/m
ρ	空气密度	1.206 kg/m ³
C_d	空气阻力系数	0.3
A_f	迎风面积	2.4 m ² ×80%
μ_f	前轮滚动阻力系数	1
μ_r	后轮滚动阻力系数	1
h	重心高度	0.52 m
l_f	前桥到重心的距离	1.110 m
l_r	后桥到重心的距离	1.756 m
r_0	车轮未变形半径	0.401 6 m
k_z	轮胎垂向刚度	220 kN/m
J_b	制动时转动惯量	0.8 kg·m ²
J_f	驱动时转动惯量	0.8 kg·m ²
θ	道路倾角	5°

由图4~6可知,在本研究所设计的控制器的控制下可以实现车辆实际速度与期望速度绝对误差的绝对值在0.1~0.6 m/s内波动。其中驱动控制时(0~<30 s),车辆的速度跟踪绝对误差的绝对值始终没有超过0.2 m/s,起步瞬间速度绝对误差的绝对值占实际速度的比值较大,会使乘客瞬间有些许的顿挫感;之后1 s内该比值突然减小到10%以下,之后3 s内该比值降至1%,顿挫感减小;其余时间内速度绝对误差的绝对值不到实际速度的1%,对于司机和乘客几乎没有影响,相较于实际速度来说该误差可以忽略不计。制动控制时(30~50 s),车辆速度跟踪绝对误差的绝对值比驱动控制时的稍大,但仍没超过0.6 m/s,在30~<43 s内速度绝对误差的绝对值最高不到实际速度的5%,对于乘客来说几乎感受不到减速产生的顿挫感;在43~48 s内该比

值逐渐升高至7%,乘客会有些许顿挫感;在仿真最后1 s内由于实际速度的减小,该比值突然升高,在这1 s内乘客会产生瞬间的顿挫感。

图7所示为4个车轮总扭矩的变化过程。由图7可知,车轮扭矩从被控制车辆起步的432 N·m开始逐步上升,到达50 s时扭矩最大,但没超过4 000 N·m。在0~<30 s内,车轮扭矩是用来驱动车辆行驶的;在30~50 s内,车轮扭矩是用来减速的,要比驱动时的车轮扭矩大。

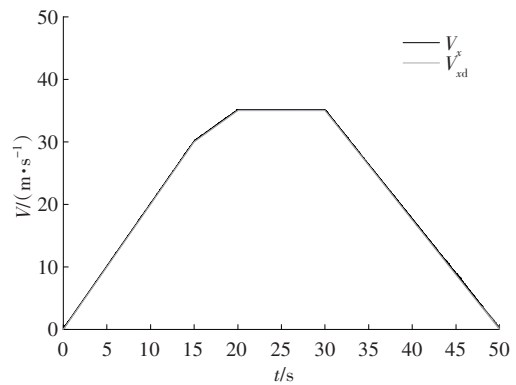


图4 实际速度与期望速度

Fig. 4 Actual speed and expected speed

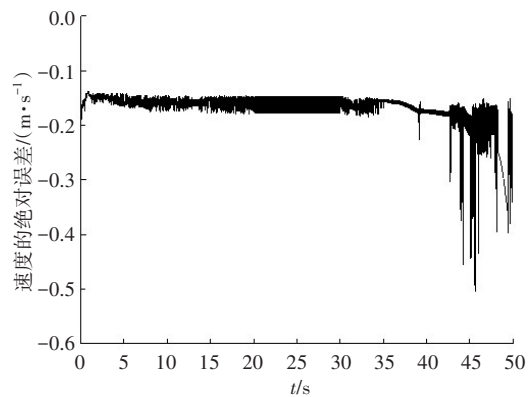


图5 速度的绝对误差

Fig. 5 Absolute error of speed

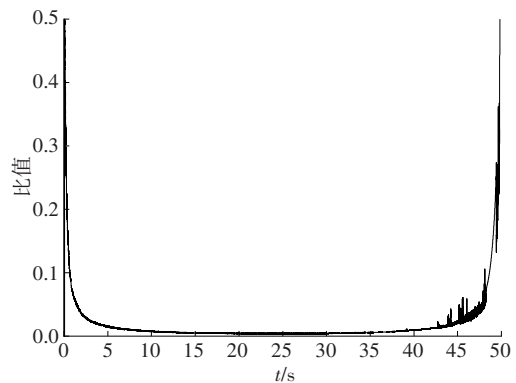


图6 速度绝对误差的绝对值与实际速度的比值

Fig. 6 Ratio of absolute value of absolute error of speed to actual speed

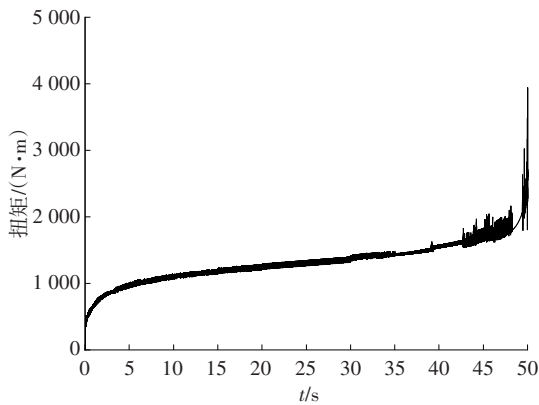


图7 车轮扭矩

Fig. 7 Wheel torque

4 讨论

本研究主要探讨了在智能车辆纵向运动过程中如何设计控制器来控制车辆的速度。通过建立精确的车辆纵向动力学模型,采用三种控制方法相结合的方式设计控制器,并通过Lyapunov的第二种方法对控制器进行稳定性证明,最后通过Simulink软件进行仿真分析。

本研究采用一种新的控制算法为自适应巡航控制提供基础,所设计的控制器能够使被控制车辆在有坡度的直线道路上按期望速度行驶。在实际应用时,可以通过车载雷达获得前车速度,并将其设置为被控制车辆的期望速度,然后在控制器的作用下输出车轮扭矩并传递给无人驾驶车辆的电控系统,通过“易四方”技术^[21]对扭矩进行1 000次/s的调节,使被控制车辆能跟随前车行驶。但在实际中,大部分道路是直线和曲线相结合的形式,本研究没有涉及弯道情况,在后续的研究中将联合车辆的横向控制,以应对车辆行驶过程中更多的道路情况。

5 结论

本研究主要对车辆纵向动力学模型及其控制器设计进行了研究,结论如下:

1) 在车辆建模方面考虑了更多的因素,并加入了一个未知扰动,在车辆纵向控制方面采用了一个新的控制方法,该方法可以为自动驾驶技术中的车辆纵向控制部分提供新的思路。

2) 通过仿真试验证明了所设计的控制器具有较好的控制效果,能满足车辆在坡度较小的直线道

路上以期望速度行驶的需求。

控制器参数的取值较困难,后续研究可以考虑采用模糊参数整定技术对参数进行取值。同时,由于试验条件限制,未能进行实车测试,后续研究中可通过实车来测试本研究控制器的效果。

参考文献(References):

- [1] 张可可,韩春阳,周京,等.精准管控下的城市交通拥堵状态研判与建模[J].交通科学与工程,2022,38(3): 113-120. DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.009. ZHANG Keke, HAN Chunyang, ZHOU Jing, et al. Towards smart management and control: a novel approach to identify traffic congestion states in urban areas[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38 (3) : 113-120. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/u.2022.03.009.
- [2] 刘军,董涛,杨海峰.车辆自动驾驶系统的纵向与横向运动综合控制策略[J].集成电路应用,2022,39(7): 252-253. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2022.07.113. LIU Jun, DONG Tao, YANG Haifeng. Integrated control strategy of longitudinal and transverse motion of vehicle auto drive system[J]. Application of IC, 2022, 39 (7) : 252-253. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2022.07.113.
- [3] 秦贵和,葛安林,雷雨龙.智能交通系统及其车辆自动控制技术[J].汽车工程,2001,23(2): 92-96. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2001.02.004. QIN Guihe, GE Anlin, LEI Yulong. The advanced automotive automatic control technologies in intelligent transport system[J]. Automotive Engineering, 2001, 23 (2) :92-96. DOI:10.19562/j.chinasae.qcgc.2001.02.004.
- [4] SHEIKHOLESLAM S, DESOER C A. A system level study of the longitudinal control of a platoon of vehicles [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1992, 114 (2) : 286-292. DOI: 10.1115/1.2896526.
- [5] 刘贺.考虑驾驶员风格的汽车纵向控制策略研究[D].长沙:湖南大学,2018. LIU He. Research on vehicle longitudinal control strategy considering driver's style[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [6] 王韬,曲大义,徐胜,等.车辆自动驾驶纵向运动控制优化及求解算法[J].中国工程机械学报,2022,20(1): 30-34,39. DOI:10.15999/j.cnki.311926.2022.01.010. WANG Tao, QU Dayi, XU Sheng, et al. Longitudinal motion control optimization and solution algorithm for vehicle automated driving [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2022, 20 (1) : 30-34, 39. DOI: 10.15999/j.cnki.311926.2022.01.010.
- [7] 李以农,郑玲,郝奕,等.基于参数自整定模糊PID的汽车纵向控制[J].江苏大学学报(自然科学版),2006,27(1):22-26. DOI:10.3969/j.issn.1671-7775.2006.01.006.

- LI Yinong, ZHENG Ling, HAO Yi, et al. Parameters self-tuning fuzzy-PID control on vehicle longitudinal control [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2006, 27(1): 22-26. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2006.01.006.
- [8] 谯艳娟, 李以农, 李应全. 模糊控制在汽车制动纵向控制中的应用[J]. 汽车研究与开发, 2003(3): 25-29.
QIAO Yanjuan, LI Yinong, LI Yingquan. Application of fuzzy control in longitudinal control of automobile braking[J]. Automobile Research & Development, 2003(3): 25-29.
- [9] 李广南, 叶洪涛, 罗文广. 基于IPSO-MPC的无人驾驶车辆纵向运动控制[J]. 广西科技大学学报, 2022, 33(1): 94-100, 109. DOI: 10.16375/j.cnki.cn45-1395/t.2022.01.014.
LI Guangnan, YE Hongtao, LUO Wenguang. Longitudinal motion control of unmanned vehicle based on IPSO-MPC [J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2022, 33(1): 94-100, 109. DOI: 10.16375/j.cnki.cn45-1395/t.2022.01.014.
- [10] ECKSTEIN J, PEITZ S, SCHÄFER K, et al. A comparison of two predictive approaches to control the longitudinal dynamics of electric vehicles [J]. Procedia Technology, 2016, 26: 465-472. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.08.059.
- [11] 江浩斌, 冯张棋, 洪阳珂, 等. 应用于车辆纵向控制的无模型自适应滑模预测控制方法[J]. 汽车工程, 2022, 44(3): 319-329. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2022.03.003.
JIANG Haobin, FENG Zhangqi, HONG Yangke, et al. Model-free adaptive sliding mode predictive control algorithm for vehicle longitudinal control [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(3): 319-329. DOI: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2022.03.003.
- [12] 王靖岳, 汪杰, 王浩天. 基于模型预测控制的无人驾驶汽车纵向速度控制研究[J]. 机械设计, 2021, 38(增刊1): 69-74. DOI: 10.13841/j.cnki.jxsj.2021.s1.016.
WANG Jingyue, WANG Jie, WANG Haotian. Research on longitudinal speed control of driverless car based on model predictive control[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(sup 1): 69-74. DOI: 10.13841/j.cnki.jxsj.2021.s1.016.
- [13] 刘金琨. 滑模变结构控制MATLAB仿真[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2012.
LIU Jinkun. Sliding mode control design and MATLAB simulation [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [14] 贺有源, 李国文, 王浩坤. 四旋翼无人机自适应反步滑模姿态控制器设计[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 57-63. DOI: 10.13954/j.cnki.hdu.2019.02.011.
HE Youyuan, LI Guowen, WANG Haokun. Design of an adaptive backstepping sliding mode attitude controller for quadrotor helicopters[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences), 2019, 39(2): 57-63. DOI: 10.13954/j.cnki.hdu.2019.02.011.
- [15] 李威, 田春宝. 基于自适应反步滑模控制的无人机滚转控制[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2022, 39(3): 33-39.
LI Wei, TIAN Chunbao. Roll control of UAV based on an adaptive backstepping sliding mode control [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2022, 39(3): 33-39.
- [16] 赵岩, 孙丽颖. 多机电力系统TCSC改进自适应backstepping滑模控制[J]. 控制工程, 2018, 25(7): 1232-1236. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.160443.
ZHAO Yan, SUN Liying. Improved adaptive backstepping sliding mode control for multi-machine power system TCSC [J]. Control Engineering of China, 2018, 25(7): 1232-1236. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.160443.
- [17] 张瀚文, 王俊雄. 基于自适应反步滑模的AUV推进器容错控制[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(4): 420-427. DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2021.04.008.
ZHANG Hanwen, WANG Junxiong. Fault-tolerant control of AUV thruster based on adaptive backstepping sliding mode [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, 29(4): 420-427. DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2021.04.008.
- [18] 魏延辉, 蒋志龙, 贺佳林, 等. 一种复合干扰下的欠驱动AUV反步自适应模糊滑模控制方法: 中国, CN110618606B[P]. 2022-06-17.
WEI Yanhui, JIANG Zhilong, HE Jialin, et al. A backstepping adaptive fuzzy sliding mode control method for underactuated AUV under composite interference: China, CN110618606B[P]. 2022-06-17.
- [19] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control [M]. 2nd ed. Boston: Springer, 2012.
- [20] 张新, 郭靖文. 基于MATLAB/AMESim的精密整平作业车调平液压系统控制算法联合仿真[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(4): 89-99, 117. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxxbzk.2021.04.013.
ZHANG Xin, GUO Jingwen. Co-simulation of control algorithm for leveling hydraulic system of precision leveling vehicle based on MATLAB/AMESim [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(4): 89-99, 117. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxxbzk.2021.04.013.
- [21] 中国经济周刊编辑部. 仰望携“易四方”技术正式亮相 比亚迪以颠覆性技术打造高端品牌[J]. 中国经济周刊, 2023(增刊1): 92-93.
Editorial Department of China Economic Weekly. Looking forward to the official appearance of BYD with the technology of "Easy Sifang" and building a high-end brand with subversive technology [J]. China Economic Weekly, 2023(sup 1): 92-93.

(责任编辑:石月珍)