

牵引拖车系统中未知纵向与横向滑动参数的辨识与控制

李鑾晏, 王朝立

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月30日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月31日

摘要

在物流运输以及农业作业之类的复杂场景当中, 牵引拖车系统往往会在实际运行中遇到存在沙子、泥泞、冰雪等复杂路况, 车轮极易发生打滑现象, 从而产生纵向以及横向的滑移情况, 这对其运动控制性能造成了极为严重的影响。本研究首先建立具有纵向和纵向滑移的牵引拖车系统的运动学模型, 其次通过运用滑模估计器, 估计未知的纵向和横向滑动参数, 最后设计出针对单个牵引拖车系统的轨迹跟踪控制器, 以及针对多个牵引拖车系统的分布式自适应编队控制器。经仿真验证, 这些策略在具有横向滑移和纵向滑移未知的情况下, 能够切实有效地提升系统性能。往后应当对复杂场景应用展开探索, 对算法予以优化, 进而推动多牵引拖车系统在多个领域取得更为良好的发展。

关键词

多牵引拖车系统, 滑动参数辨识, 编队控制策略, 自适应控制

Identification and Control of Unknown Longitudinal and Transverse Sliding Parameters in the Tow Trailer System

Liuyan Li, Chaoli Wang

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 30th, 2025; accepted: May 23rd, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

Logistics transportation and agricultural operations such as complex scenarios, tow trailer system

文章引用: 李鑾晏, 王朝立. 牵引拖车系统中未知纵向与横向滑动参数的辨识与控制[J]. 建模与仿真, 2025, 14(5): 1153-1160. DOI: 10.12677/mos.2025.145465

often encountered in the actual operation of sand, mud, ice and conditions, snow, the wheel easy skid phenomenon, resulting in longitudinal and transverse slip, the motion control performance caused very serious influence. In this study, we first developed the kinematic model of the tow-trailer system with transverse and longitudinal sliding, then used the sliding mode estimator to estimate the unknown longitudinal and lateral sliding parameters and finally designed a track tracking controller for a single tow-trailer system and a distributed adaptive formation controller for multiple tow-trailer systems. By simulation verification, these strategies can effectively improve the system performance when the transverse slip and longitudinal slip are unknown. In the future, the application of complex scenarios should be explored, and the algorithm should be optimized to promote the better development of the multi-tow trailer system in multiple fields.

Keywords

Multi-Tow Trailer System, Sliding Parameter Identification, Formation Control Strategy, Adaptive Control

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

多牵引拖车系统在物流运输、农业作业等诸多领域有着极为广泛的应用, 不过其所处运行环境呈现出复杂的特性, 纵向与横向滑动这类现象普遍存在着, 这对系统的运动控制性能以及作业效率产生极大程度的不良影响。要想实现良好的控制效果, 准确估计未知的滑移参数并实现轨迹跟踪控制和分布式编队尤为关键。本研究首先构建具有纵向滑移和横向滑移参数未知的牵引拖车系统的运动学模型, 通过设计滑移估计器用来对未知的滑移比进行估计, 同时设计轨迹跟踪控制器和分布式编队控制器, 目的在于提升系统性能, 为实现多牵引拖车系统在复杂场景中的应用给予理论支撑。

2. 研究对象与模型构建

2.1. 单个牵引拖车运动学模型拓展

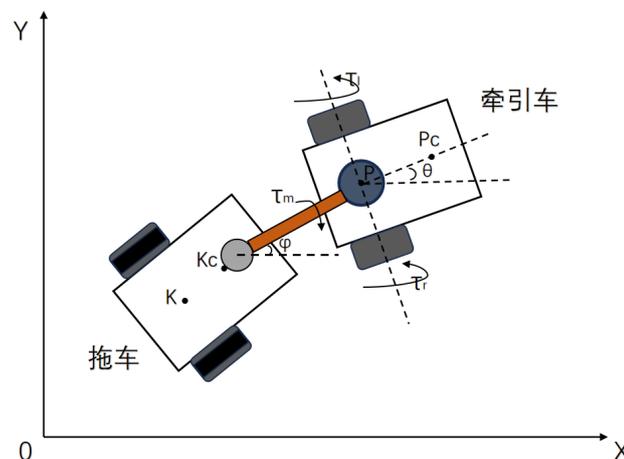


Figure 1. Structure of the towing trailer system

图 1. 牵引拖车系统结构图

在物流运输以及农业作业这些复杂场景中,多牵引拖车系统往往由于实际生活中路面状况存在沙子、冰雪、泥泞等复杂情况,进而导致车轮会发生纵向与横向的滑移,这对运动控制性能产生了极为严重的影响。所以,针对单个牵引拖车发生横向或纵向滑移时的运动学模型展开深入探究。在车轮无滑动时,

$$\text{牵引拖车移动机器人运动学模型为: } \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{\phi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta(t) & 0 & 0 \\ \sin\theta(t) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \end{bmatrix}。图1呈现了单个牵引拖车的结构,$$

牵引车由两个差分驱动轮组成,而拖车由两个可以全向转动的万向轮组成,其中牵引车与拖车由一个带有转向电机的牵引梢连接,这种结构也被称为主动铰接式牵引拖车,具有良好的转向性能[1]。

牵引车左右驱动轮线速度为 $v_l = r\omega_l, v_r = r\omega_r$, 纵向滑移比 $i_l = \frac{r\omega_l - v_l^s}{r\omega_l}, i_r = \frac{r\omega_r - v_r^s}{r\omega_r}$, 打滑时车轮线速度 $v_l^s = r\omega_l(1-i_l), v_r^s = r\omega_r(1-i_r)$ 。横向滑移比 $\gamma = \tan\alpha$ (α 为横向滑移角)综合滑移因素,牵引拖车运

$$\text{动学模型为: } \begin{cases} \dot{x} = \frac{r\omega_l(1-i_l) + r\omega_r(1-i_r)}{2} \\ \dot{y} = -\frac{r\omega_l(1-i_l) + r\omega_r(1-i_r)}{2} \gamma \\ \dot{\theta} = \frac{r\omega_r(1-i_r) - r\omega_l(1-i_l)}{b} \\ \dot{\phi} = \omega_2 \end{cases}, \text{ 经坐标变换 } \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix}, \text{ 可得:}$$

$$\begin{cases} \dot{X} = \frac{r\omega_l(1-i_l) + r\omega_r(1-i_r)}{2} (\cos\theta + \gamma \sin\theta) \\ \dot{Y} = \frac{r\omega_l(1-i_l) + r\omega_r(1-i_r)}{2} (\sin\theta - \gamma \cos\theta) \\ \dot{\theta} = \frac{r\omega_r(1-i_r) - r\omega_l(1-i_l)}{b} \\ \dot{\phi} = \omega_2 \end{cases}。若定义纵向滑移速度 $\dot{x} = \frac{r\omega_l(1-i_l) + r\omega_r(1-i_r)}{2}$, 则模型可$$

$$\text{整理为: } \begin{cases} \dot{X} = \dot{x}(\cos\theta + \gamma \sin\theta) \\ \dot{Y} = \dot{x}(\sin\theta - \gamma \cos\theta) \\ \dot{\theta} = -\frac{2\dot{x}}{b} + \frac{2r}{b} \omega_r(1-i_r) = \frac{2\dot{x}}{b} - \frac{2r}{b} \omega_l(1-i_l) \\ \dot{\phi} = \omega_2 \end{cases}。最终呈矩阵形式: \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta + \gamma \sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta - \gamma \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix}。$$

这些模型精准刻画了单个牵引拖车在纵向和横向滑移下的运动状态,为多拖车系统研究奠定基础。

2.2. 多个牵引拖车系统编队描述

在工业生产过程中,经常使用多个牵引拖车轮式移动机器人协作来运输大型的、大量的物体,而机器人的编队控制是多机器人合作完成复杂任务的前提。多牵引拖车系统编队形式丰富,有直线、梯队、菱形编队等,各适用于不同场景。如直线编队在狭窄通道运输空间利用率高,梯队编队在灵活转向场合表现更佳。以相对位置编队描述为例,设第 i 个牵引拖车相对参考机器人的期望相对位置为 (x_i^d, y_i^d) , 期望相对角度为 θ_i^d 和 φ_i^d 。在实际运行的情况下,牵引拖车由于纵向与横向的滑移,致使其实际位置和角度偏离了预期状态,进而对编队稳定性造成影响。纵向滑移会改变拖车间的间距,若不及时加以调整,极有可能导致编队变得松散甚至引发碰撞;横向滑移会让行驶方向出现偏差,破坏编队的几何形状,就像

在直线编队中, 横向滑移会使拖车偏离直线轨迹, 对编队的行进方向产生影响。路面坡度的变化、风力等外界干扰同样对编队稳定性有作用, 这些因素相互交织, 加大了编队控制的复杂性[2]。深入了解这些影响因素对于设计出有效的编队控制策略而言极为关键。

2.3. 多牵引拖车系统整体运动学模型

基于单个牵引拖车运动学模型构建多牵引拖车系统整体模型。设多牵引拖车系统由 N 个牵引拖车组成, 第 i 个牵引拖车位姿向量为 $[x_i, y_i, \theta_i, \varphi_i]^T$ 。

$$\text{第 } i \text{ 个牵引拖车系统整体运动学模型: } \begin{cases} \dot{X} = \frac{r\omega_{li}^i(1-i_l^i) + r\omega_{lr}^i(1-i_r^i)}{2}(\cos\theta_i + \gamma_i \sin\theta_i) \\ \dot{Y} = \frac{r\omega_{li}^i(1-i_l^i) + r\omega_{lr}^i(1-i_r^i)}{2}(\sin\theta_i - \gamma_i \cos\theta_i), \text{ 式中 } \omega_{li}^i, \omega_{lr}^i, \\ \dot{\theta} = \frac{r\omega_{lr}^i(1-i_r^i) - r\omega_{li}^i(1-i_l^i)}{b} \\ \dot{\varphi} = \omega_2^i \end{cases}$$

i_l^i 、 i_r^i 、 γ_i 分别为第 i 个拖车牵引车左右驱动轮角速度、纵向滑移比和横向滑移比。该运动学模型为设计分布式编队策略奠定基础。

2.4. 研究问题

本文的研究问题主要分为两个部分: 1) 针对单个牵引拖车移动机器人设计轨迹跟踪控制器, 使得跟踪

$$\text{上虚拟机器人的参考轨迹, 即实现 } \begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) - x_r(t) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) - y_r(t) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \theta(t) - \theta_r(t) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) - \varphi_r(t) = 0 \end{cases}, \text{ 其中 } [x_r(t), y_r(t), \theta_r(t), \varphi_r(t)]^T \text{ 为参考轨迹。} 2)$$

$$\text{多个牵引拖车移动机器人的编队控制, 即实现 } \begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) - x_r(t) - d_i^x = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} y_i(t) - y_r(t) - d_i^y = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \theta(t) - \theta_r(t) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) - \varphi_r(t) = 0 \end{cases}, \text{ 其中 } [d_i^x, d_i^y]^T \text{ 为第 } i \text{ 个机器人}$$

与参考机器人期望的相对位置。

3. 未知滑动参数辨识方法

为了实现具有纵向和横向滑移未知的单个牵引拖车的轨迹跟踪控制和多个牵引拖车系统的编队控制, 引入如下非线性滑模控制器, 用来对横向与纵向的滑移参数进行估计:

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}} = \dot{x} \cos\theta + L_1 \operatorname{sgn}(X - \hat{X}) + L_1(X - \hat{X}) \\ \dot{\hat{\theta}} = \frac{2\dot{x}}{b} + L_3 \operatorname{sgn}(\theta - \hat{\theta}) + L_2(\theta - \hat{\theta}) \\ \dot{\hat{\theta}}_1 = -\frac{2\dot{x}}{b} + L_4 \operatorname{sgn}(\theta - \hat{\theta}) + L_2(\theta - \hat{\theta}) \end{cases}$$

其中, $L_j > 0 (j=1,2,3,4)$ 是滑模增益, $\dot{\hat{X}}$ 、 $\dot{\hat{\theta}}$ 、 $\dot{\hat{\theta}}_1$ 分别用于估计参考机器人的速度、方向角速度和设计

滑模面的方向角速度, $\text{sgn}(x)$ 为符号函数。通过理论层面的深入剖析以及仿真实验的充分验证可知, 此滑模估计器在多牵引拖车系统当中呈现出极为优异的表现。当面临各式各样不同的路面摩擦系数以及负载情形时, 其能够迅速收敛至真实的滑移参数数值, 并且估计误差一直维持在一个相对较小的范围之内, 为后续开展精确控制给予强有力的支撑。

4. 控制策略设计

4.1. 轨迹跟踪控制器设计

针对单个的牵引拖车系统, 为了使其可以跟踪上参考机器人的参考轨迹, 设计如下控制器:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos e_3 + k_1(v_r, \omega_{1r}) e_1 \\ \omega_{1r} + (1 + \gamma^2) k_2 v_r e_2 + (1 + \gamma^2) k_3(v_r, \omega_{1r}) v_r \sin e_3 \\ \omega_{2r} + k_4(\omega_{2r}) e_4 \end{bmatrix}$$

$$\text{其中} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta + \gamma \sin \theta & \sin \theta - \gamma \cos \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta + \gamma \cos \theta & \cos \theta + \gamma \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r - X \\ Y_r - Y \\ \theta_r - \theta \\ \varphi_r - \varphi \end{bmatrix} \text{为牵引拖车轨迹跟踪误差方程, } k_2 \text{ 是一个正}$$

常数, $k_1(v_r, \omega_{1r})$ 、 $k_3(v_r, \omega_{1r})$ 和 $k_4(\omega_{2r})$ 是具有有界一阶导数的连续有界函数。因为滑移参数 i_l 、 i_r 和 γ 是未知的, 需要使用滑模估计器进行估计。

4.2. 分布式编队控制器设计

分布式编队控制算法堪称提升多牵引拖车系统运行效能的一项关键技术。它摆脱了集中式控制那种依赖全局信息的模式, 使得每个拖车只需依据与相邻拖车之间的局部信息来做出控制决策, 切实有效地解决了通信瓶颈以及单点故障这两大问题, 极大地提高系统的可靠性与灵活性。在多牵引拖车系统当中, 要想精确控制每个牵引拖车的运动, 定义第 i 个牵引拖车的邻居集合为 N_i 。第 i 个牵引拖车的控制输入 $[v_i, w_{1r}^i, w_{2r}^i]^T$, 依据如下分布式控制律确定:

$$\begin{cases} v_i = v_i^d + k_1^i \sum_{j \in N_i} (x_j - x_i - x_{ij}^d) \\ w_1^i = w_{1r}^i + (1 + \gamma_i^2) k_2^i v_i^d \sum_{j \in N_i} (y_j - y_i - y_{ij}^d) + (1 + \gamma_i^2) k_3^i v_i^d \sin(\theta_j - \theta_i - \theta_{ij}^d) \\ w_2^i = w_{2r}^i + k_4^i (\varphi_j - \varphi_i - \varphi_{ij}^d) \end{cases}$$

其中 $[v_i^d, w_{1r}^i, w_{2r}^i]^T$ 代表第 i 个拖车的期望速度和角速度, $(x_{ij}^d, y_{ij}^d, \theta_{ij}^d, \varphi_{ij}^d)$ 是其与第 j 个相邻牵引拖车的期望相对位置和角度, $k_1^i, k_2^i, k_3^i, k_4^i$ 为控制增益。运用李雅普诺夫稳定性理论深入探究后发现, 此算法能够引领多牵引拖车系统的编队误差朝着渐近收敛至零的方向发展。在不同初始编队误差以及外界干扰环境条件下开展诸多仿真实验, 实验成果表明, 该算法能够迅速对拖车运动状态予以调节, 让编队误差在较短时间内得以显著降低, 在整个运行全程都能稳固维系编队稳定性, 对于纵向和横向滑移均有着极为优秀的适应能力, 切实有力地验证了其的有效性与可靠性。

4.3. 自适应编队控制策略

多牵引拖车系统于实际运行过程当中, 会受到诸如路面摩擦系数发生改变、负载进行动态调整以及外部环境干扰等一系列不确定因素的作用, 致使纵向和横向的滑移参数持续变动, 传统的固定参数的控

制策略难以契合性能方面的需求, 自适应编队控制策略便顺势出现[3]。此策略的关键在于依据实时所辨识出的滑动参数以及系统状态的改变情况, 自动对控制参数予以调整。借助滑模估计器和多传感器数据融合技术, 实时获取每个拖车的纵向滑移比 i_l^i, i_r^i 、横向滑移比 γ_i 等系统状态信息。以控制增益自适应调整为例, 将控制增益 $k_1^i, k_2^i, k_3^i, k_4^i$ 设定为滑动参数和系统状态的函数。比如, 当纵向滑移比增大时, 增大 k_1^i 以强化纵向位置偏差调节; 横向滑移比大或速度高时, 增加 k_2^i 提升横向位置偏差控制效果。采用自适应律实现控制参数动态调整, 以 k_1^i 为例, 自适应律为 $\dot{k}_1^i = \tau_1^i \left(e_1^i \sum_{j \in N_i} (x_j - x_i - x_{ij}^d) \right)$, 其中 τ_1^i 是自适应增益矩阵, e_1^i 为纵向位置跟踪误差, 它依据误差实时调整 k_1^i , 使控制器更好适应系统变化[4]。通过运用李雅普诺夫稳定性理论展开理论层面的剖析, 证实了此策略能够确保系统的稳定性。在不同工况条件下所开展的仿真实验表明[5], 当面临路面摩擦系数突然发生改变等状况时, 该策略能够迅速地对控制参数加以调整, 使拖车得以维持稳定的编队行驶状态, 并且编队误差能够快速恢复到较小的程度, 充分彰显出其具备强大的自适应能力以及鲁棒性[6]。

5. 仿真实验验证多种控制策略有效性

仿真实验的目的为验证单个牵引拖车系统轨迹跟踪控制器的有效性和多牵引拖车系统里分布式自适应编队控制策略的有效性。实验平台搭建方面, 借助 MATLAB/Simulink 构建多牵引拖车系统仿真模型。依照已搭建好的单个和整体运动学模型, 对拖车的运动予以模拟。设置拖车的初始位置、速度、角度等参数, 以此模拟实际运行时的不同初始状态。引入路面摩擦系数、负载状况等环境参数, 通过调节这些参数来模拟复杂的作业场景[7]-[9]。

5.1. 轨迹跟踪控制仿真

选择参考轨迹为 $v_r(t) = e^{-100t}$, $\omega_{1r} = 1$, $\omega_{2r} = 1$ 。牵引拖车初始的位置跟踪误差为 $[e_1(0), e_2(0), e_3(0), e_4(0)]^T = [4, 3, 2, 1]^T$ 。图 2 展示了在 0~30 秒仿真内牵引拖车的轨迹跟踪误差渐近收敛到 0。

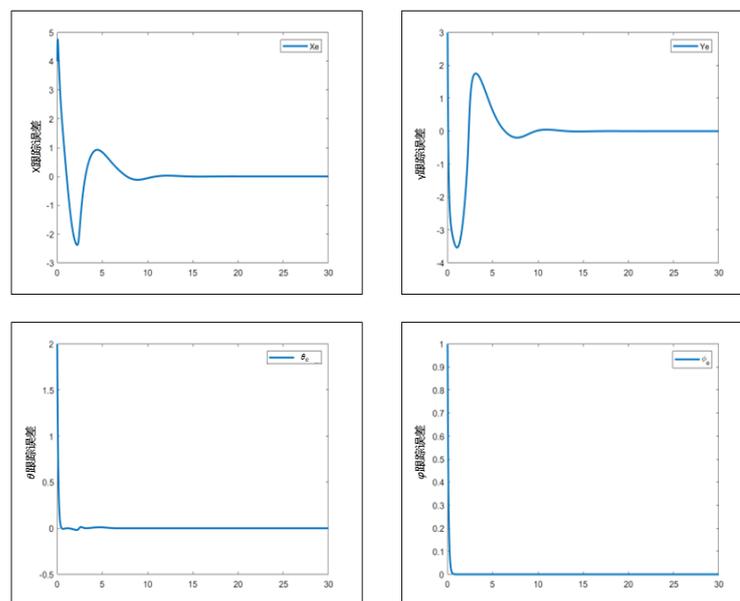


Figure 2. Error plot of tractor-trailer trajectory tracking
图 2. 牵引拖车轨迹跟踪的误差图

由图 2 发现所提出的控制方法可以有效地克服移动机器人产生的位置滑移, 这主要是因为所设计的跟踪控制器具有自适应能力, 其一些控制参数正在自适应修改。此外, 当机器人的滑动参数发生变化时, 跟踪控制器可以自动调整这些参数, 来满足移动机器人在真实环境中的需求。

5.2. 分布式编队控制仿真

进行分布式编队控制算法实验, 设置多组不一样的初始编队误差, 像在直线编队情形下, 把相邻拖车的初始纵向位置误差设定成 ± 0.5 米, 横向位置误差设定成 ± 0.3 米, 角度误差设定成 ± 5 。依据分布式控制律来计算每个拖车的控制输入, 对拖车的运动状态进行实时调整[10]。记录下不同时刻各个拖车的位置、速度和角度信息, 进而计算出编队误差。

自适应编队控制策略可以实时获取拖车的纵向和横向滑移参数。依据自适应律, 对控制增益进行动态调整, 举例来讲, 当纵向滑移比增大 10% 的时候, 依照自适应律增大对应的控制增益[11]。表 1 记录了拖车在控制参数调整期间的运动状态改变情况, 以及编队误差的恢复情况。

Table 1. Adaptive formation control strategy simulation data

表 1. 自适应编队控制策略仿真数据

时间(s)	纵向滑移比	横向滑移比	控制增益 k_1	控制增益 k_2	纵向编队误差(m)	横向编队误差(m)
0	0.05	0.032	0.50	0.40	0.05	0.03
1	0.061	0.041	0.62	0.43	0.07	0.041
2	0.065	0.045	0.64	0.52	0.09	0.048
3	0.072	0.052	0.72	0.56	0.10	0.062
4	0.063	0.044	0.63	0.52	0.09	0.049
5	0.056	0.039	0.61	0.49	0.06	0.04
6	0.048	0.034	0.58	0.47	0.05	0.029
8	0.044	0.028	0.53	0.44	0.04	0.024
10	0.04	0.023	0.49	0.41	0.03	0.02

关于分布式编队控制算法的结果显示, 在各类不同的初始编队误差以及外界干扰状况下, 该分布式编队控制算法都具备快速调节拖车运动状态的能力。就拿初始纵向位置误差处于 ± 0.5 米、横向位置误差处于 ± 0.3 米且风速为 4 m/s 这种情形来说, 经过大约 10 秒的调节之后, 编队误差能够降低 80% 以上, 而且在整个运行阶段, 编队始终保持着良好的稳定性, 能够切实有效地适应纵向与横向的滑移情况。再看自适应编队控制策略的结果, 一旦路面摩擦系数突然减小, 自适应编队控制策略可以在 3 秒之内迅速对控制参数做出调整, 让拖车持续保持稳定的编队行驶状态。编队误差在 10 秒内能够恢复至较小的程度, 与传统的固定参数控制策略相比, 其自适应能力以及鲁棒性有了极为显著的提升。

6. 结语

在本次研究中, 我们致力于构建多牵引拖车系统的运动学模型, 并取得了显著成果。首先, 我们对单个牵引拖车的运动学模型进行了拓展, 深入分析其具有横向滑移和纵向滑移未知的运动学特性, 从而为后续的控制律设计奠定基础。其次详细描述了多个牵引拖车系统的编队情况, 考虑了车辆之间的相对位置、速度以及姿态等因素, 搭建多牵引拖车系统的整体运动学模型, 为系统的精确控制提供了理论支持。

为了实现对多牵引拖车系统的有效控制, 我们引入了滑模估计器。利用其独特的滑模特性, 首先实现了单个牵引拖车的轨迹跟踪控制, 使拖车能够准确地跟随预设轨迹行驶。进一步地, 将滑模估计器应用于多个牵引拖车的自适应编队控制, 使整个编队能够根据实时环境和任务需求自动调整队形, 保持稳定的编队状态。

仿真结果有力地验证了所提控制策略的有效性。同时, 控制策略具有较高的收敛性, 能够快速地将系统达到稳定状态, 并且在面对外部干扰或内部参数变化时, 展现出较强的鲁棒性, 确保系统性能不受较大影响。这些优异的性能指标充分证明了所构建模型体系和控制策略的实际应用价值。现实场景远比仿真情况更为复杂, 当中存在着众多不确定因素。往后还需要进一步深入探究系统在复杂场景中的应用, 对控制算法加以优化, 增强系统应对复杂环境的能力以及抗干扰的强度, 以此推动多牵引拖车系统在物流、工业等更多领域得以广泛应用, 提升其综合效能与实用价值。

基金项目

Natural Science Foundation (62173232, 62003214, 62173054)。

参考文献

- [1] Liu, Z., Yue, M., Guo, L. and Zhang, Y. (2020) Trajectory Planning and Robust Tracking Control for a Class of Active Articulated Tractor-Trailer Vehicle with On-Axle Structure. *European Journal of Control*, **54**, 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2019.12.003>
- [2] 王岱安. 基于融合感知的车辆编队控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 泉州: 华侨大学, 2023.
- [3] 薛祥希. 基于双环自适应滑模控制的高速列车运行追踪[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2024.
- [4] 肖广兵, 邢启明, 孙宁. 基于多虚拟领航者的智能车编队控制研究[J/OL]. 南京信息工程大学学报, 1-16. <https://doi.org/10.13878/j.cnki.jnuist.20240522002>, 2025-03-23.
- [5] 张卫波, 肖继亮. 改进 RRT 算法在复杂环境下智能车路径规划中的应用[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 225-234.
- [6] 徐利伟. 智能网联汽车队列成形控制及队列稳定性研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.
- [7] 杨秀建, 李金雨. 基于非线性模型预测控制的车辆纵向队列协调控制[J]. 汽车工程, 2020, 42(2): 184-190.
- [8] Fernando, M. (2021) Online Flocking Control of UAVs with Mean-Field Approximation. 2021 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Xi'an, 30 May-5 June 2021, 8977-8983. <https://doi.org/10.1109/icra48506.2021.9560899>
- [9] Guo, J., Luo, Y. and Li, K. (2016) Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Coordinated Longitudinal and Lateral Motions of Multiple Autonomous Vehicles in a Platoon. *Science China Technological Sciences*, **60**, 576-586. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-0606-1>
- [10] 汪贵庆, 袁杰, 沈庆宏. 基于精英蚁群算法的交通最优路径研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2019, 55(5): 709-717.
- [11] 赵玉炆. 基于自适应动态规划的多智能体最优一致性控制算法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2022.