

# 数字孪生驱动的商用车队列纵横向控制

于树友<sup>1</sup>, 谢华城<sup>1</sup>, 李文博<sup>1</sup>, 李永福<sup>2</sup>, 陈虹<sup>1,3</sup>, 林宝君<sup>1</sup>

(1. 吉林大学通信工程学院, 长春 130022; 2. 重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室, 重庆 400065; 3. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 考虑了队列行驶时的纵向和横向运动, 提出了基于数字孪生的车辆队列协同控制系统。纵向运动设计采用 PID 控制, 以保证队列的稳定行驶。横向运动设计采用 LQR 控制, 以保证横向车道跟踪性能。由 Prescan、TruckSim、Matlab/Simulink 搭建数字孪生仿真场景, 基于纵向和横向控制, 对车辆队列的纵向跟随和横向车道跟踪性能进行动态仿真。数字孪生通过远程控制车辆队列和监测队列的纵/横向速度、横向位置和横摆角偏差等指标, 对控制策略和参数进行全面调试和优化。仿真结果表明, 数字孪生驱动的商用车队列控制系统具有良好的队列跟踪和车道保持性能。

**关键词:** 自动控制技术; 数字孪生; 车辆队列; 车道保持; 纵横向控制

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)06-1994-09

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231367

## Digital twin driven longitudinal and lateral control of truck platoon

YU Shu-you<sup>1</sup>, XIE Hua-cheng<sup>1</sup>, LI Wen-bo<sup>1</sup>, LI Yong-fu<sup>2</sup>, CHEN Hong<sup>1,3</sup>, LIN Bao-jun<sup>1</sup>

(1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Air-Ground Cooperative Control, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 3. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A vehicle platoon cooperative control system based on digital twin was proposed, considering the longitudinal and lateral motion. The proportional-integral-derivative (PID) control was designed to ensure stable driving of the convoy. The linear quadratic regulator (LQR) control was designed to ensure the lateral lane tracking performance. A digital twin simulation scenario was build using Prescan, TruckSim, and Matlab/Simulink, and the longitudinal following and lateral lane tracking performance of vehicle queues was dynamically simulated based on longitudinal and lateral control. The digital twin comprehensively debugs and optimizes the control strategy and parameters by remotely controlling the vehicle platoon and monitoring indicators such as longitudinal and lateral velocity, lateral position and yaw angle deviation of the platoon. The simulation results show that the digital twin driven truck platoon control

**收稿日期:** 2023-12-08.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(U1964202); 工业物联网与网络化控制教育部重点实验室开放基金项目(2019FF01); 吉林省科学基金项目(YDZJ202101ZYTS169).

**作者简介:** 于树友(1974-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 预测控制, 鲁棒控制. E-mail: shuyou@jlu.edu.cn

**通信作者:** 林宝君(1974-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 精密机床制造及其自动化. E-mail: linbj@jlu.edu.cn

system has good tracking performance and lane-keeping performance.

**Key words:** automatic control technology; digital twin; vehicle platoon; lane-keeping; longitudinal and lateral control

## 0 引言

车辆队列系统由2辆或2辆以上的智能车辆组成,通过车载传感器、车路通信等技术共享车辆的信息,实现车辆以期望的速度和车间距行驶<sup>[1,2]</sup>。车辆队列控制可以缓解交通拥堵,提高交通安全和降低能源消耗<sup>[3]</sup>。

数字孪生的概念起源于美国航空航天局2002年提出的“数字孪生”计划<sup>[4]</sup>。数字孪生技术通过先进的建模和仿真技术,创建火箭和飞行器的数字模型,并分析其性能和行为。随着汽车智能化水平的提高,数字孪生技术已开始应用于车辆队列控制领域<sup>[5]</sup>。数字孪生技术是一种将物理系统与其数学模型相结合,通过模拟和仿真技术进行预测、优化和控制的技术手段。数字孪生将物理实体的各个方面以数字形式进行建模和仿真,实现对物理系统的监测和优化<sup>[6]</sup>。基于数字孪生技术的车辆队列控制领域主要涉及以下几个方面。

**数字孪生模型建立:**数字孪生模型是实现队列数字孪生的基础,该模型包括车辆特性、行驶行为、车辆间的相互作用等<sup>[7]</sup>。文献[8]基于电动汽车的时间序列行为建模,引入现实世界电动汽车的数字孪生模型,对电动汽车的充电算法和充电桩布置策略进行评估。文献[9]开发了一个移动数字孪生框架,该框架由物理空间以及在数字空间中相关联的数字孪生体组成。

**数据同步和更新:**数字孪生模型需要与真实车辆的数据进行实时同步和更新,以确保模型的准确性和实时性,且通过车辆传感器、交通监控系统等获取实时数据,更新数字孪生模型。文献[10]将数据划分为块并缓存在路边单元(Consecutive roadside units, RSU)中,同时优化数据块在RSU上的分配,使车辆以最小成本完成数据下载,实现数据的同步和更新。

**队列间距和控制策略优化:**数字孪生技术可以用于开发和测试不同的队列间距和控制策略,评估其对车辆队列的影响,并优化控制策略提高交通流稳定性。文献[7]提出了一种基于数字孪生的多车实验平台。构建车辆的数字孪生模型,并将其与实

际车辆进行实时同步和交互,在虚拟环境中进行实验和测试,以评估车辆性能,优化控制策略。

**车辆运行状态监测和风险评估:**数字孪生技术对车辆设备进行健康状态监测和预测,能实现车辆故障诊断、维护等功能。文献[11]提出利用数字孪生技术预测队列中智能车辆的轨迹,提高了队列的安全性和效率。文献[12]通过在Matlab/Simulink中创建智能数字孪生体,实现了永磁同步电机的健康监测和预测。

实现数字孪生的软件有Prescan、SUMO、Car-Maker、TruckSim等。本文基于Prescan、TruckSim和Matlab/Simulink搭建数字孪生平台,模拟真实道路上车辆队列的运动和行为。在TruckSim中建立与商用车相匹配的动力学模型,采用纵向和横向解耦控制策略,纵向采用PID控制,横向采用LQR控制,结合Prescan实现车辆队列控制,便于与实际车辆测试相结合,提高驾驶安全性。同时,考虑了实际场景的局限性,如校园道路曲率大,建筑密集,且存在较高的空间复杂度和地形不规则性,在Prescan、TruckSim和Matlab/Simulink联合仿真中,构建了与物理世界相似的场景。结果表明,数字孪生技术在实际应用中是有效的。

## 1 数字孪生架构

如图1所示的数字孪生技术架构,物理世界与孪生空间相映射,物理世界将采集的地图数据通过网络通信传输至孪生空间。本文采用2台计算机实现对物理世界行为和状态的远程控制和远程监测。本文结合Prescan、TruckSim和Matlab/Simulink搭建数字孪生仿真平台,实现对车辆控制系统的全面建模、仿真和优化。

(1)Prescan是汽车自动驾驶仿真平台,具有传感器模型、车辆动力学模型、场景编辑和仿真等功能。Prescan的仿真地图是基于物理世界道路环境建模的虚拟地图。仿真地图通过高精度的数据采集和建模技术,准确还原真实道路结构、交通标志、信号灯、障碍物等元素,并支持复杂场景模拟,如图1的第①部分所示。

(2)TruckSim是用于仿真和研究商用车行驶

动力学的计算机软件。TruckSim 提供准确的车辆动力学模型,能够模拟不同类型和尺寸的商用车在不同道路条件下的行驶特性,如图 1 的第②部分所示。在孪生空间中,Matlab/Simulink 用于开发车辆控制算法,并联合 Prescan、TruckSim 实现远程控制。

(3)通过激光雷达和毫米波摄像头等设备采集地图的部分道路和建筑等信息,在 Prescan 中

搭建数字孪生场景。孪生场景可以模拟各种车辆轨迹和道路条件,测试和评估数字孪生系统的性能,实现车辆队列的远程监测,如图 1 的第③部分所示。

(4)本文结合东风商用车 KJ1V 的数据,在 TruckSim 中设置对应的动力学参数,并进行车辆动力学验模,如图 1 的第④部分所示。TruckSim 中模型的准确性是保障数字孪生有效的基础。

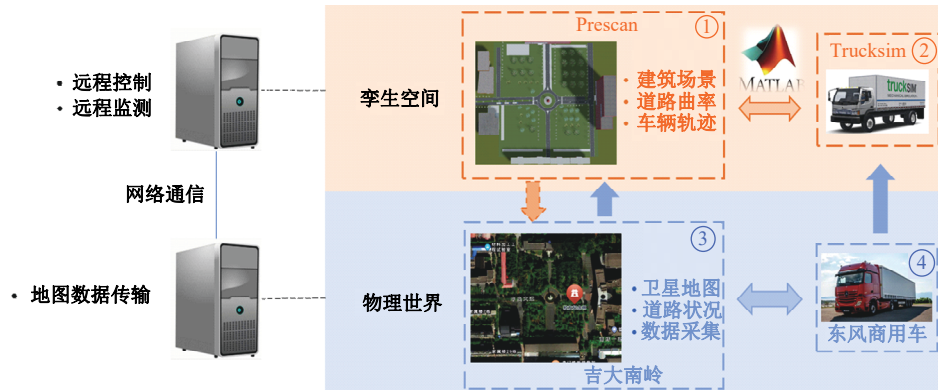


图 1 数字孪生架构

Fig. 1 Digital twin architecture

## 2 车辆纵横向动力学建模

假设商用车队列由 1 辆领航车和  $n$  辆跟随车组成,其中领航车用 0 表示,跟随车分别用  $1, 2, \dots, n$  表示。

### 2.1 纵向动力学模型

纵向动力学方程<sup>[13]</sup>为:

$$m_i \dot{v}_i^x = 2F_i^{xf} + 2F_i^{xr} - F_{\text{dissp}} \quad (1)$$

力平衡方程为:

$$\begin{cases} F_{\text{dissp}} = F_{\text{aero}} + R_{xr} + R_{xf} \\ R_{xr} + R_{xf} = m_i g f_i \\ F_{\text{aero}} = C_{A,i} (v_i^x)^2 \\ 2F_i^{xf} + 2F_i^{xr} = (\eta_{T,i} / r_{w,i}) T_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: $m_i$ 为车的总质量; $v_i^x$ 为第  $i$  辆车的纵向速度; $F_i^{xf}$ 和  $F_i^{xr}$ 分别为前、后轮的纵向力; $F_{\text{dissp}}$ 为纵向受到阻力的合力,包含空气阻力  $F_{\text{aero}}$ 、前/后轮滚动阻力  $R_{xr}$  和  $R_{xf}$ ;  $g$  为重力加速度; $f_i$  为滚动阻力系数; $C_{A,i}$  为集总空气动力阻力系数; $\eta_{T,i}$  为传动系统的机械效率; $r_{w,i}$  为轮胎半径; $T_i$  为实际驱动/制动扭矩。

引入车辆纵向位置  $x_i$ , 将发动机的输入输出特性用一阶惯性环节表示,并结合式(1)(2),得到车辆非线性纵向动力学方程为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i^x \\ \frac{\eta_{T,i}}{r_{w,i}} T_i = m_i \dot{v}_i^x + C_{A,i} (v_i^x)^2 + m_i g f_i \\ \tau_i \dot{T}_i + T_i = T_{d,i} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $T_{d,i}$ 为期望的驱动或制动扭矩; $\tau_i$ 为发动机的滞后时间常数。

为降低模型的复杂度,采用精确反馈线性化方法<sup>[15]</sup>,将非线性动力学式(3)转化为线性动力学,即:

$$\begin{aligned} T_{d,i} &= \frac{\eta_{T,i}}{r_{w,i}} (C_{A,i} v_i^x (2\tau_i a_i^x + v_i^x) + \\ & m_i g f_i + m_i u_i) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $a_i^x$ 为纵向加速度; $u_i$ 为期望的加速度。

将式(4)代入式(3),得到线性车辆动力学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i^x \\ \dot{v}_i^x = a_i^x \\ \tau_i \dot{a}_i^x + a_i^x = u_i \end{cases} \quad (5)$$

### 2.2 横向动力学和车道保持模型

#### 2.2.1 横向动力学模型

车辆横摆动力学模型如图 2 所示,微分方程为:

$$\begin{cases} \dot{v}_i^y = -v_i^x \dot{\phi}_i + \frac{1}{m_i} (2F_i^{yf} + 2F_i^{yr}) \\ \ddot{\phi}_i = \frac{1}{I_i^z} (l_{l,i} 2F_i^{yf} - l_{r,i} 2F_i^{yr}) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $v_i^y$  为第  $i$  辆车的横向速度;  $\dot{\phi}_i$  为横摆角速度;  $F_i^{yf}$  和  $F_i^{yr}$  分别为前、后轮侧向力;  $l_{l,i}$  和  $l_{r,i}$  分别为车辆质心与前轴和后轴的距离;  $I_i^z$  为转动惯量。

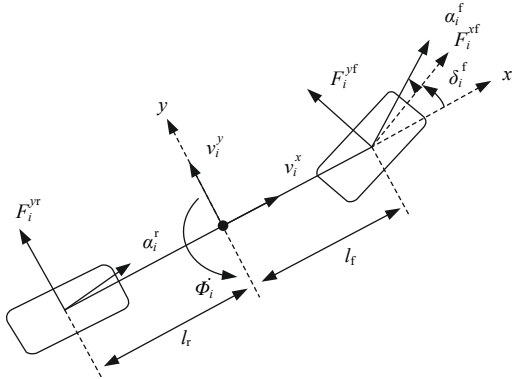


图 2 车辆横摆动力学模型

Fig. 2 Vehicle yaw dynamic model

线性轮胎模型为:

$$\begin{cases} F_i^{yf} = C_i^{cf} \left( \frac{v_i^y + l_{l,i} \dot{\phi}_i}{v_i^x} - \delta_i \right) \\ F_i^{yr} = C_i^{cr} \left( \frac{v_i^y - l_{r,i} \dot{\phi}_i}{v_i^x} \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $C_i^{cf}$  和  $C_i^{cr}$  分别为前、后轮侧偏刚度;  $\delta_i$  为前轮转角。

### 2.2.2 车道保持模型

为保证车辆沿车道中心线行驶,考虑车道保持模型<sup>[16]</sup>。车道保持模型的结构如图 3 所示。

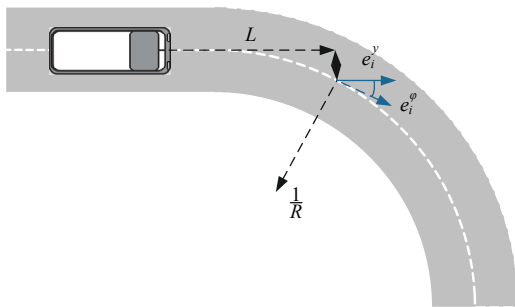


图 3 车道保持模型结构

Fig. 3 Structure of lane-keeping model

定义横向位置误差和车辆偏航角误差为:

$$\begin{cases} \dot{e}_i^y = v_i^y + L \dot{\phi}_i - v_i^x e_i^\phi \\ \dot{e}_i^\phi = \dot{\phi}_i - \dot{\phi}_{i,des} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $e_i^y$  为预瞄点与车道中心线的横向偏差;  $L$  为道路预瞄距离;  $e_i^\phi$  为车辆行驶方向与预瞄点处道

路切线之间航向角误差;  $\dot{\phi}_{i,des}$  为期望横摆角速度,  $\dot{\phi}_{i,des} = v_i^x/R$ , 其中  $R$  为时变的道路曲率半径。

定义横向位置偏差和车辆偏航角误差变化率为:

$$\begin{cases} \ddot{e}_i^y = \dot{v}_i^y + L \ddot{\phi}_i - v_i^x \dot{e}_i^\phi \\ \ddot{e}_i^\phi = \ddot{\phi}_i - \ddot{\phi}_{i,des} \end{cases} \quad (9)$$

将式(8)和式(9)代入式(6)和式(7),定义状态量  $\xi_i^h = [e_i^y, \dot{e}_i^y, e_i^\phi, \dot{e}_i^\phi]$ , 控制量  $u_i^h = \delta_i$ , 输出变量  $y_i^h = [e_i^y, \dot{e}_i^y, e_i^\phi, \dot{e}_i^\phi]$ , 外部输入变量  $w_i^h = [v_i^x, \dot{\phi}_{i,des}]$ , 则车辆横向动力学的路径跟踪偏差状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_i^h(t) = A_i^h(v_i^x) \xi_i^h(t) + B_i^h u_i^h(t) + E_i^h \dot{\phi}_{i,des}(t) \\ y_i^h(t) = C_i^h \xi_i^h(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $A_i^h$ 、 $B_i^h$ 、 $C_i^h$ 、 $E_i^h$  均为系统矩阵。

$$\begin{aligned} A_i^h(v_i^x) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{i,22}^h(v_i^x) & a_{i,23}^h & a_{i,24}^h(v_i^x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{i,42}^h(v_i^x) & a_{i,43}^h & a_{i,44}^h(v_i^x) \end{bmatrix} \\ a_{i,22}^h &= -\frac{(C_i^{cf} + C_i^{cr})}{m_i v_i^x}; \quad a_{i,42}^h = \frac{-C_i^{cf} l_{l,i} + C_i^{cr} l_{r,i}}{I_i^z v_i^x}; \\ a_{i,23}^h &= \frac{(C_i^{cf} + C_i^{cr})}{m_i}; \quad a_{i,43}^h = \frac{C_i^{cf} l_{l,i} - C_i^{cr} l_{r,i}}{I_i^z}; \\ a_{i,24}^h &= \frac{(-C_i^{cf}(l_{l,i} - L) + C_i^{cr}(l_{r,i} + L))}{m_i v_i^x}; \\ a_{i,44}^h &= -\frac{(C_i^{cf}(l_{l,i} - L)l_{l,i} + C_i^{cr}(l_{r,i} + L)l_{r,i})}{I_i^z v_i^x}; \\ B_i^h &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{C_i^{cf}}{m_i} & 0 & \frac{C_i^{cf} a_i}{I_i^z} \end{bmatrix}^T; \quad C_i^h = \text{diag}[1, 1, 1, 1]; \\ E_i^h &= \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-C_i^{cf}(l_{l,i} - L) + C_i^{cr}(l_{r,i} + L) - m_i (v_i^x)^2}{m_i v_i^x} \\ 0 \\ \frac{(C_i^{cf} l_{l,i}(l_{l,i} - L) + C_i^{cr} l_{r,i}(l_{r,i} + L))}{I_i^z v_i^x} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

## 3 商用车队列控制器设计

### 3.1 纵向控制器设计

纵向跟随控制策略的目的是实现车辆队列稳定跟随前车行驶并与前车保持安全距离。

本文采用固定时距策略(Constant time headway policy, CTHP)<sup>[17]</sup>。在CTHP中,车辆期望车间距随着被控车速度的变化进行调整。该策略与人

为驾驶习惯接近:当高速行驶时,增大车间距,保证安全性能;当低速行驶时,减小车间距,提高交通效率。

期望车间距 $x_{i, des}$ 定义为:

$$x_{i, des} = hv_i^r + d_0 \quad (11)$$

式中: $d_0$ 为静止时车辆间的安全距离; $h$ 为固定时距,表示车辆 $i$ 在匀速行驶时,车辆 $i$ 与前车 $i-1$ 之间的距离。

设计以车间距误差和相对速度为反馈信号,并将其调节为零的PID控制器。采用前车跟随<sup>[18]</sup>策略,第 $i$ 辆车与前车的车间距 $x_r$ 和车间距误差 $x_{i,e}$ 为:

$$\begin{cases} x_r = x_{i-1} - x_i \\ x_{i,e} = x_r - x_{i,des} \end{cases} \quad (12)$$

因此,第 $i$ 辆车的PID控制输入信号 $u_i$ 为<sup>[19]</sup>:

$$u_i = k_p x_{i,e} + k_v \dot{x}_{i,e} \quad (13)$$

式中: $k_p$ 、 $k_v$ 分别为PID控制中的比例调节系数和微分调节系数; $\dot{x}_{i,e}$ 为车间距误差 $x_{i,e}$ 的导数。

定义输入输出拉普拉斯变换 $L(x_i(t))=X_i(s)$ , $L(u_i(t))=U_i(s)$ 。对式(5)进行拉普拉斯变换,得到传递函数 $G_i(s)$ 为:

$$G_i(s) = \frac{X_i(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{s^2(\tau_i s + 1)} \quad (14)$$

式中: $X_i(s)$ 、 $U_i(s)$ 分别为 $x_i(t)$ 、 $u_i(t)$ 经拉普拉斯变换后对应的像函数; $s$ 为复频率变量。

### 3.2 横向控制器设计

本文通过LQR<sup>[20]</sup>实现横向路径跟踪,横向控制器结构如图4所示。其中,反馈控制通过LQR获得,前馈控制通过道路曲率等公式计算。

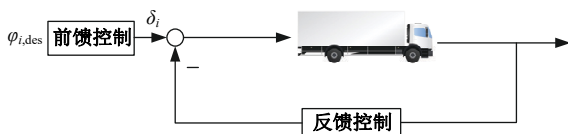


图4 横向控制器结构

Fig. 4 Lateral controller structure

#### 3.2.1 反馈控制器设计

基于线性系统(10),LQR性能指标设计如下:

$$J_i^h = \int_0^{\infty} (\xi_i^h)^T Q_i^h \xi_i^h + (u_i^h)^T R_i^h (u_i^h) dt = \int_0^{\infty} (\xi_i^h)^T (Q_i^h + K^T R_i^h K) \xi_i^h dt \quad (15)$$

通过对代价函数式(15)求导,得状态反馈矩阵为:

$$K = (R_i^h + (B_i^h)^T P B_i^h)^{-1} B_i^h P A_i^h \quad (16)$$

其中, $P$ 满足代数Riccati方程,即:

$$(A_i^h)^T P + P A_i^h - P B_i^h (R_i^h)^{-1} B_i^h P + Q_i^h = 0 \quad (17)$$

通过求解Riccati方程式(17),计算控制增益:

$$K_i^h = (R_i^h)^{-1} B_i^h P \quad (18)$$

式中: $Q_i^h$ 、 $R_i^h$ 为正定权重矩阵。

对应的LQR控制率 $\delta_i^h$ 为:

$$\delta_i^h = -K_i^h \xi_i^h \quad (19)$$

式中: $K_i^h$ 为LQR增益。

#### 3.2.2 前馈控制器设计

车辆前方的道路几何形状是转向决策中最重要的因素之一。车辆行驶在弯曲路段,式(10)中存在 $E_i^h \dot{\phi}_{i,des}(t)$ 状态量,车辆横向位置误差和偏航角误差均无法收敛至0<sup>[21]</sup>,因此本文在反馈控制器的基础上,设计了前馈控制器,保障车辆稳定行驶。

定义前馈控制的前轮转角为 $\delta_i^f$ ,则系统式(10)可改写为:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i^h(t) = & A_i^h \xi_i^h(t) + B_i^h u_i^h(t) + \\ & E_i^h \dot{\phi}_{i,des}(t) + B_i^h \delta_i^f(t) \end{aligned} \quad (20)$$

对式(20)进行拉普拉斯变换,并通过终值定理,得到系统状态量的稳态值 $e_s$ 为:

$$e_s = -(A_i^h - B_i^h K_i^h)^{-1} (B_i^h \delta_i^f + E_i^h v_i^r \kappa) \quad (21)$$

式中: $\kappa$ 为道路曲率半径 $R$ 的倒数。

前轮转角 $\delta_i^f$ 的表达式为:

$$\delta_i^f = \kappa \left[ l_{l,i} + l_{r,i} - l_{r,i} k_3 - \frac{mv_{x,i}^2}{l_{l,i} + l_{r,i}} \left( \frac{l_{r,i}}{2C_i^{cf}} + \frac{l_{l,i}}{2C_i^{cr}} k_3 - \frac{l_{l,i}}{2C_i^{cr}} \right) \right] \quad (22)$$

前馈控制器通过曲率扰动的信息,改善车辆跟踪曲线轨迹时的瞬态行为,结合反馈控制率,横向控制器的总转向角 $u_i^h$ 为:

$$u_i^h = \delta_i^f + \delta_i^h \quad (23)$$

## 4 Matlab/TruckSim/Prescan 联合仿真

商用车队列由1辆领航车(第0辆车)和2辆跟随车(第1辆车和第2辆车)组成。TruckSim提供车辆动力学模型;由Matlab/Simulink设计控制器,并实现队列控制;采用Prescan设计与“吉林大学南岭校区”相近的仿真场景,包含教学楼、树木、道路等信息。仿真中均为同质车辆,车辆动力学参数如表1所示。

基于数字孪生的优化队列控制器参数具有高

表 1 车辆动力学参数

Table 1 Parameters of trucks	
参数	数值
$m_i/\text{kg}$	18 000
$I_i^z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	130 421.8
$l_{i,i}/\text{m}$	3.5
$l_{e,i}/\text{m}$	1.5
$\tau_i/\text{s}$	0.25
$C_i^{ef}/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	$5.422\ 5\times 10^5$
$C_i^{er}/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$	$1.066\ 3\times 10^5$

效性和可重复性。相较于传统实车实验的试错方法,数字孪生可以快速地进行多次仿真实验,节约了时间和成本开销。同质车辆队列的纵向和横向控制器参数如表 2 所示。

表 2 纵向和横向控制器参数

Table 2 Parameters of the longitudinal and lateral controller

参数	数值
$k_x$	8.1
$k_v$	0.9
$d_0/\text{m}$	9.5
$h/\text{s}$	0.6
$L/\text{m}$	5
$Q_i^h$	diag(1 000, 100, 1000, 100)
$R_i^h$	1 000

注:道路宽度为 3.75 m,商用车车身宽度为 2.45 m。

“吉林大学南岭校区”Prescan 仿真场景如图 5 所示,具体仿真结果如图 6~11 所示。

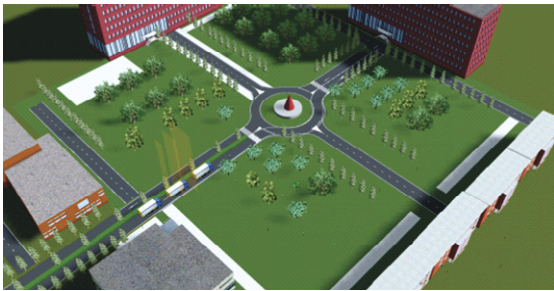


图 5 “吉林大学南岭校区”Prescan 仿真场景  
Fig. 5 “Nanling Campus of Jilin University”  
Prescan simulation scene

(1) 工况 1——低速校园

领航车初始速度为 7 m/s,校园内干燥沥青路面的道路附着系数较大,道路附着系数设置为  $\mu = 0.85$ 。分析图 6 商用车位置和图 7 道路曲率可知,在较大道路曲率工况下,跟随车与前车保持安全距离。在图 8 所示纵向速度中,领航车与跟随车车速在进入弯道处发生微小变化,驶出弯道后逐渐平稳,最终收敛至 7 m/s。由图 9 可以看

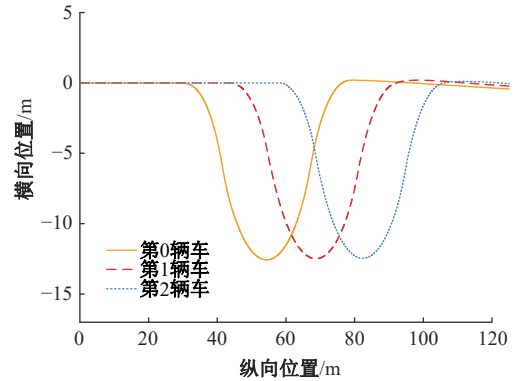


图 6 商用车位置

Fig. 6 Trajectory of trucks

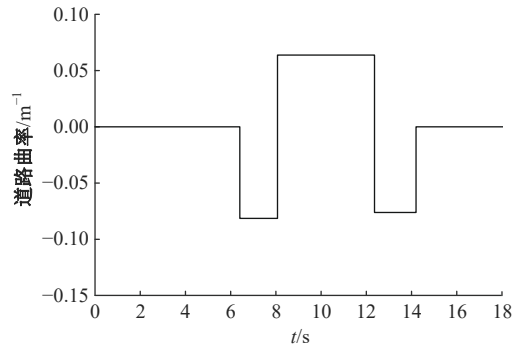


图 7 道路曲率

Fig. 7 Road curvature

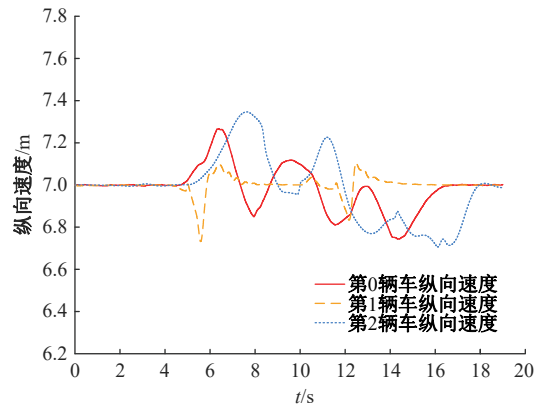


图 8 纵向速度

Fig. 8 Longitudinal velocity

出,跟随车前轮转角均在物理约束范围内,最大转角约为  $22^\circ$ 。由图 10 和图 11 可以看出,当道路曲率发生微小变化时,车辆的横向位置偏差和横摆角偏差也会在允许范围内发生相应变化,但车辆均未驶出车道边线。

为进一步分析不同速度和道路场景下基于数字孪生的队列控制性能,下一工况设置高速弯道仿真。

(2) 工况 2——高速公路

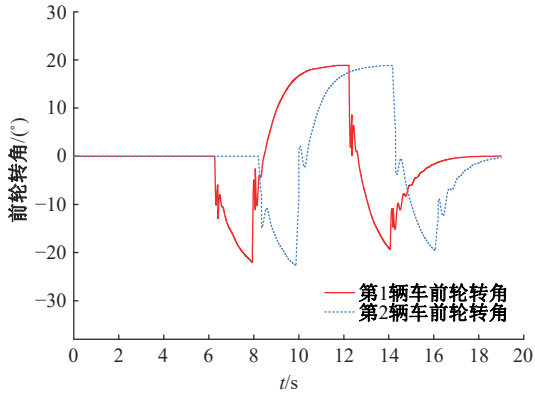


图 9 前轮转角  
Fig. 9 Front wheel slip angle

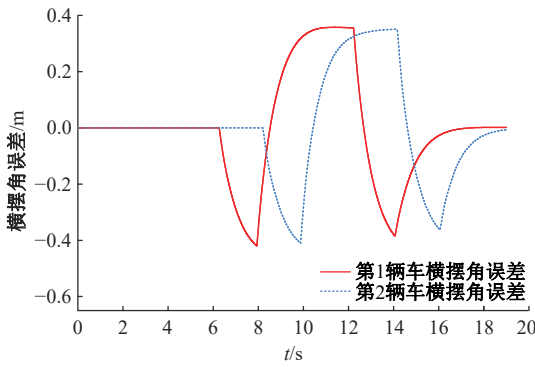


图 10 横摆角偏差  
Fig. 10 Yaw angle offset

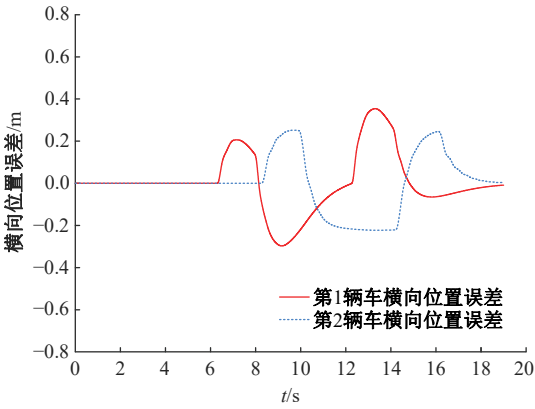


图 11 横向位置偏差  
Fig. 11 Lateral position offset

领航车初始速度为 20 m/s, 高速公路干燥沥青路面的道路附着系数设置为  $\mu = 0.85$ 。图 12 为 Prescan 仿真场景俯视图, 仿真结果如图 13~18 所示。

分析图 13 商用车位置和图 14 道路曲率可知, 在弯道处, 跟随车与前车保持安全距离。由图 15 可知, 领航车和跟随车以 20 m/s 匀速行驶。由图 16 可知, 弯道处最大转角为  $-8^\circ$ , 最终收敛至 0。

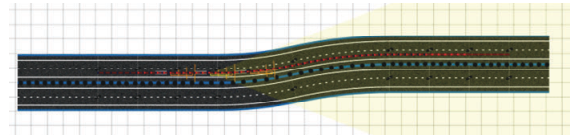


图 12 “高速公路”Prescan 仿真场景  
Fig. 12 “Expressway” Prescan simulation scene

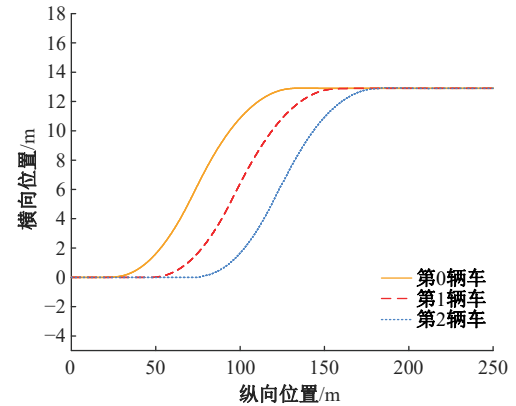


图 13 商用车位置  
Fig. 13 Trajectory of trucks

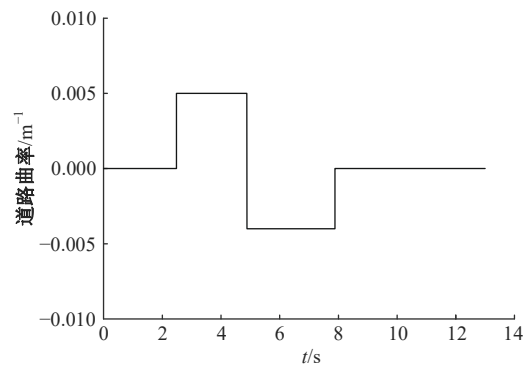


图 14 道路曲率  
Fig. 14 Road curvature

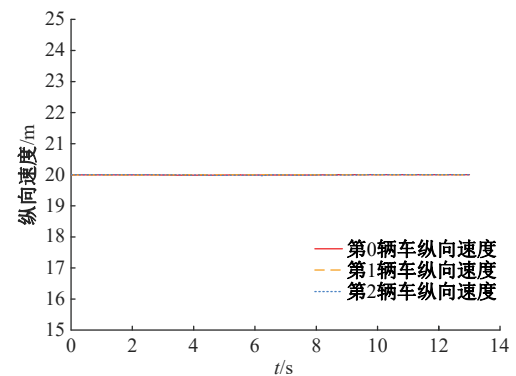


图 15 纵向速度  
Fig. 15 Longitudinal velocity

由图 17 和图 18 可知: 横摆角偏差和横向位置偏差在高速路况下的变化较小, 横向位置偏差最大为 0.1 m, 队列具有良好的控制效果。

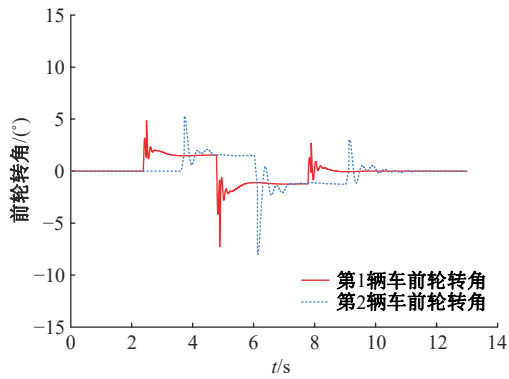


图 16 前轮转角

Fig. 16 Front wheel slip angle

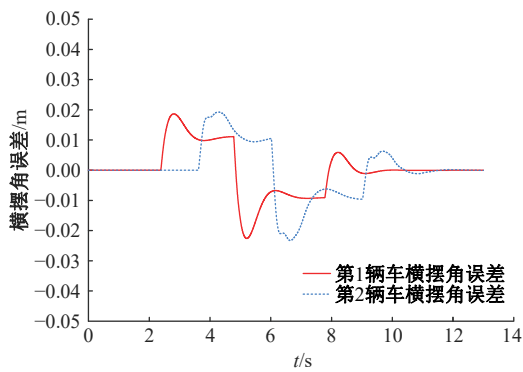


图 17 横摆角偏差

Fig. 17 Yaw angle offset

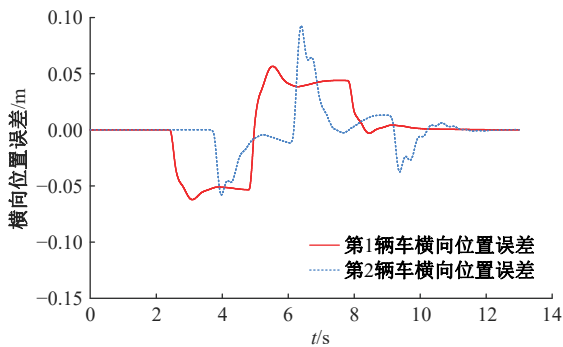


图 18 横向位置偏差

Fig. 18 Lateral position offset

## 5 结束语

本文设计了基于数字孪生的商用车控制系统,在 Prescan、TruckSim、Matlab/Simulink 联合的数字孪生仿真场景中,采用孪生空间远程控制算法远程监测车辆状态,并分析了 2 种不同仿真场景的数据。本文采用纵向和横向解耦的控制策略,纵向采用 PID 控制,跟踪前车的纵向速度,并保持期望的安全距离;横向采用考虑车道保持模型的 LQR 控制,确保车辆行驶在车道线内。仿真

结果表明,数字孪生驱动的队伍能够实现良好的纵向跟踪性能和横向车道保持性能。数字孪生为准确评估不同控制策略和参数的效果,并优化车辆队列性能提供了一个可靠的方法。

### 参考文献:

- [1] Feng S, Zhang Y, Li S E, et al. String stability for vehicular platoon control: definitions and analysis methods[J]. Annual Reviews in Control, 2019, 47: 81-97.
- [2] Jia D, Ngoduy D. Platoon based cooperative driving model with consideration of realistic inter-vehicle communication[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 68: 245-264.
- [3] Liang K Y, Mårtensson J, Johansson K H. Heavy-duty vehicle platoon formation for fuel efficiency[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 17(4): 1051-1061.
- [4] 林珩, 徐丙立, 肖昕, 等. 数字孪生人文地理环境[J]. 遥感学报, 2024, 28(5): 1131-1144.  
Lin Hui, Xu Bing-li, Xiao Xin, et al. Digital twin human geographic environment[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024, 28(5): 1131-1144.
- [5] Dasgupta S, Rahman M, Lidbe A D, et al. A transportation digital-twin approach for adaptive traffic control systems[J/OL]. [2023-11-01]. <https://arxiv.org/abs/2109.10863>
- [6] Jones D, Snider C, Nassehi A, et al. Characterising the digital twin: a systematic literature review[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, 29: 36-52.
- [7] Yang C, Dong J, Xu Q, et al. Multi-vehicle experiment platform: a digital twin realization method[C]// 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Narvik, Norway, 2022: 705-711.
- [8] Zhang T, Liu X, Luo Z, et al. Time series behavior modeling with digital twin for Internet of vehicles[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, 2019: 1-11.
- [9] Ding C, Ho I W H. Digital-twin-enabled city-model-aware deep learning for dynamic channel estimation in urban vehicular environments[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2022, 6(3): 1604-1612.
- [10] Yang X, Zheng J, Luan T H, et al. Data synchronization for vehicular digital twin network[C]//GLOBE-

- COM 2022-2022 IEEE Global Communications Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2022: 5795-5800.
- [11] Du H, Leng S, He J, et al. Digital twin based trajectory prediction for platoons of connected intelligent vehicles[C]//2021 IEEE 29th International Conference on Network Protocols (ICNP), Dallas, TX, USA, 2021: 1-6.
- [12] Venkatesan S, Manickavasagam K, Tengenai N, et al. Health monitoring and prognosis of electric vehicle motor using intelligent-digital twin[J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(9): 1328-1335.
- [13] Rajamani R, Tan H S, Law B K, et al. Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(4): 695-708.
- [14] Zheng Y, Li S E, Wang J, et al. Stability and scalability of homogeneous vehicular platoon: Study on the influence of information flow topologies[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 17(1): 14-26.
- [15] Xiao L, Gao F. Practical string stability of platoon of adaptive cruise control vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1184-1194.
- [16] Kianfar R, Ali M, Falcone P, et al. Combined longitudinal and lateral control design for string stable vehicle platooning within a designated lane[C]//17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Qingdao, China, 2014: 1003-1008.
- [17] Falcone P, Tufo M, Borrelli F, et al. A linear time varying model predictive control approach to the integrated vehicle dynamics control problem in autonomous systems[C]//2007 46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, LA, USA, 2007: 2980-2985.
- [18] Wei S, Zou Y, Zhang X, et al. An integrated longitudinal and lateral vehicle following control system with radar and vehicle-to-vehicle communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1116-1127.
- [19] Naus G, Vugts R, Ploeg J, et al. String-stable CACC design and experimental validation: a frequency-domain approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(9): 4268-4279.
- [20] Li W, Todorov E. Iterative linear quadratic regulator design for nonlinear biological movement systems [C]//First International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Setúbal, Portugal, 2004, 222-229.
- [21] Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2011.