# 数字孪生驱动的商用车队列纵横向控制

谢华城1,李文博1,于树友1,李永福2,陈虹1,3

(1.吉林大学 控制科学与工程系,长春 130022; 2.重庆邮电大学 工业物联网与网络化控制教有部重点实验室, 重庆 400065; 3.同济大学 电子与信息工程学院,上海 200092)

**摘要:** 商用车队列在复杂交通环境下,交通流数据具有异构、多源等特性。数字孪生将物理实体以数字形式进行 建模,能处理复杂的交通流数据,进而通过远程监测和远程控制车辆状态,保证队列行驶安全。本文提出基于数 字孪生的车辆队列协同控制系统,考虑队列行驶时纵向和横向运动。纵向运动设计 PID 控制,保证队列的稳定行 驶。横向运动设计 LQR 控制,保证横向车道跟踪性能。由 Prescan、TruckSim、Matlab/Simulink 搭建的数字孪生 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的调试和优 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性能和车道保持性能。

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

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231367

# Digital twin driven longitudinal and lateral control of truck platoon

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

(1. Department of Control Science and 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:** In the complex traffic environment, the traffic flow data of truck platoon has the characteristics of heterogeneous and multi-source. Digital twin models the physical entity in digital form, which can process complex traffic flow data, and then ensure the safety of platoon driving through remote monitoring and remote control of vehicle status. In this paper, a truck cooperative control system based on digital twin is proposed, considering the longitudinal and lateral motion. The Proportional-Integral-Derivative (PID) controller is adopted as the longitudinal controller to ensure stability. The linear quadratic programming (LQR) control is designed to calculate the front wheel angle and ensure the lateral lane tracking performance. The digital twin simulation scenario built by Prescan, TruckSim and Matlab / Simulink dynamically simulates the longitudinal following and lateral lane tracking performance of the truck platoon based on longitudinal and lateral control. The digital twin comprehensively debugs and optimizes the control strategy and parameters by remotely controlling the longitudinal and lateral velocity, lateral position and yaw angle deviation of the truck platoon and monitoring platoon. The simulation results show that the digital twin-driven truck platoon control system has good tracking performance and lane-keeping performance.

Key words: Automatic control technology; Digital twin; Vehicle platoon; Lane-keeping; Longitudinal and lateral 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有部重点实验室开放基金项目资助(2019FF01); 吉林省科学基金项目(项目批准号: YDZJ202101ZYTS169).

**作者简介:**谢华城(1999-),男,硕士.研究方向:车辆队列预测控制.E-mail:hcxie21@mails.jlu.edu.cn 通信作者: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

# 0 引 言

车辆队列系统由两辆或两辆以上的智能车辆 组成,通过车载传感器、车路通讯等技术共享车辆 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在 2002年提出的"数字孪生"计划<sup>[6]</sup>。数字孪生技术 通过利用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>[4]</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与优化<sup>[5]</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:

建立数字孪生模型:数字孪生模型是实现队列 数字孪生的基础,该模型应包括车辆特性、行驶行 为、车辆间的相互作用等。文献[7]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[8]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[9]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[10]提出了一种基于数字孪生的多车 实验平台。首先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。

车辆运行状态监测与风险评估: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]提出一种利用数 字孪生技术的方法来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与预测。

实现数字孪生的软件有 Prescan、SUMO、 CarMaker、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。本文的贡献如下:

1) 提出了一种采用 Prescan、TruckSim 和 Matlab/Simulink 实现数字孪生的方法,在TruckSim 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,纵向采用的 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。

2) 在 Prescan 仿真场景建模中,考虑实际场景 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。通过构建有物 理世界相近的仿真场景,Prescan、TruckSim 和 Matlab/Simulink 联合仿真结果表明,数字孪生技术 在实际应用中的有效性。

# 1 数字孪生架构



# 图 1 数字孪生架构 Fig.1 Digital twin architecture

如图1所示的数字孪生技术架构,物理世界和 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,论文采用两台电脑实现 对物理世界的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的软件平台,包 括传感器模型、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,准确还原真实道路的结构、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 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。

4) 本文结合东风商用车 KJ1V 的数据,在 TruckSim 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。TruckSim 中模型的准 确性是保障数字孪生有效的基础。

# 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,跟随车分别表示为1,2,...,n。

# 2.1 纵向动力学模型

纵向动力学方程[13]如下:

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

力平衡方程如下:

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

其中 $m_i$ 表示车的总质量, $v_i^x$ 表示第i辆车的纵向速度, $F_i^{sf}$ 和 $F_i^{sr}$ 分别表示前轮和后轮纵向力, $F_{dissp}$ 表示纵向受到阻力的合力,包含空气阻力 $F_{aero}$ ,前后轮滚动阻力 $R_{xr}$ 和 $R_{xf}$ ,g表示重力加速度, $f_i$ 表示滚动阻力系数, $C_{A,i}$ 表示集总空气动力阻力系数, $\eta_{T,i}$ 表示传动系统的机械效率, $r_{w,i}$ 表示轮胎半径, $T_i$ 表示实际驱动/制动扭矩。

引入车辆纵向位置 x<sub>i</sub>,将发动机的输入输出特性用一阶惯性环节表示,并结合(1)和(2),车辆非线性纵向动力学为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{x}_{i} = v_{i}^{x} \\ \frac{\eta_{T,i}}{r_{w,i}} T_{i} = m_{i} \dot{v}_{i}^{x} + C_{A,i} (v_{i}^{x})^{2} + m_{i} g f_{i} \\ \tau_{i} \dot{T}_{i} + T_{i} = T_{d,i} \end{cases}$$
(3)

其中 $T_{d,i}$ 表示期望的驱动或制动扭矩, $\tau_i$ 表示发动 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(3)转化为线性动力学:

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

其中*a<sub>i</sub>* 是纵向加速度,*u<sub>i</sub>* 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:

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



图 2 车辆横摆动力学模型 Fig.2 Vehicle dynamic model

车辆横摆动力学模型如图 2, 微分方程如下:

$$\begin{cases} \dot{v}_{i}^{y} = -v_{i}^{x}\dot{\phi}_{i} + \frac{1}{m_{i}}(2F_{i}^{yf} + 2F_{i}^{yr}) \\ \ddot{\phi}_{i} = \frac{1}{I_{i}^{z}}(l_{f,i}2F_{i}^{yf} - l_{r,i}2F_{i}^{yr}) \end{cases}$$
(6)

其中 $v_i^y$ 表示第i辆车的横向速度, $\phi_i$ 表示横摆角速度, $F_i^{yf}$ 和 $F_i^{yr}$ 分别表示前轮和后轮侧向力, $l_{f,i}$ 和 $l_{r,i}$ 分别表示车辆质心与前轴和后轴的距离, $I_i^z$ 表示转动惯量。

线性轮胎模型如下:

$$F_{i}^{yf} = C_{i}^{cf} \left( \frac{v_{i}^{y} + l_{f,i} \dot{\phi}_{i}}{v_{i}^{x}} - \delta_{i} \right)$$

$$F_{i}^{yr} = C_{i}^{cr} \left( \frac{v_{i}^{y} - l_{r,i} \dot{\phi}_{i}}{v_{i}^{x}} \right)$$
(7)

其中 $C_i^{cf}$ 和 $C_i^{cr}$ 分别表示前后轮侧偏刚度, $\delta_i$ 表示前轮转角。

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: 定义横向位置误差和车辆偏航角误差:

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

其中 e<sup>y</sup>表示预瞄点与车道中心线的横向偏差, L表 示道路预瞄距离, e<sup>o</sup> 表示车辆行驶方向与预瞄点处 道路切线之间航向角误差, qi des 表示期望横摆角速 度。 $\dot{\phi}_{i\,des} = v_i^x / R$ , R 是时变的道路曲率半径。



图 3 车道保持模型结构图

# Fig.3 The structure of lane-keeping model.

定义横向位置偏差和车辆偏航角误差变化率:

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

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

$$\begin{cases} \dot{\xi}_{i}^{h}(t) = A_{i}^{h}(v_{i}^{x})\xi_{i}^{h}(t) + B_{i}^{h}u_{i}^{h}(t) + E_{i}^{h}\dot{\phi}_{i,des}(t) \\ y_{i}^{h}(t) = C_{i}^{h}\xi_{i}^{h}(t) \end{cases}$$
(10)

其中,系统矩阵如下:

$$\begin{split} A_{i}^{h}(v_{i}^{x}) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{i,22}^{h}(v_{i}^{x}) & a_{i,23}^{h} & a_{i,24}^{h}(v_{i}^{x}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{i,42}^{h}(v_{i}^{x}) & a_{i,43}^{h} & a_{i,44}^{h}(v_{i}^{x}) \end{bmatrix} \\ a_{i,22}^{h} &= -\frac{\left(C_{i}^{cf} + C_{i}^{cr}\right)}{m_{i}v_{i}^{x}}, a_{i,42}^{h} &= \frac{-C_{i}^{cf}l_{f,i} + C_{i}^{cr}l_{r,i}}{I_{i}^{z}v_{i}^{x}}, \\ a_{i,23}^{h} &= \frac{\left(C_{i}^{cf} + C_{i}^{cr}\right)}{m_{i}}, a_{i,43}^{h} &= \frac{C_{i}^{cf}l_{f,i} - C_{i}^{cr}l_{r,i}}{I_{i}^{z}}, \\ a_{i,24}^{h} &= \frac{\left(-C_{i}^{cf}(l_{f,i} - L) + C_{i}^{cr}(l_{r,i} + L)\right)}{m_{i}v_{i}^{x}}, \end{split}$$

$$a_{i,44}^{h} = -\frac{\left(C_{i}^{cf}(l_{f,i}-L)l_{f,i} + C_{i}^{cr}(l_{r,i}+L)l_{r,i}\right)}{I_{i}^{z}v_{i}^{x}},$$

$$B_{i}^{h} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{C_{i}^{cf}}{m_{i}} & 0 & \frac{C_{i}^{cf}a_{i}}{I_{i}^{z}} \end{bmatrix}^{T}, C_{i}^{h} = diag[1, 1, 1, 1], \\ E_{i}^{h} = \begin{bmatrix} 0 & \\ -C_{i}^{cf}(l_{f,i} - L) + C_{i}^{cr}(l_{r,i} + L) - m_{i}(v_{i}^{x})^{2} \\ \\ \frac{-C_{i}^{cf}(l_{f,i} - L) + C_{i}^{cr}(l_{r,i} + L) - m_{i}(v_{i}^{x})^{2} \\ \\ 0 & \\ -\frac{\left(C_{i}^{cf}l_{f,i}(l_{f,i} - L) + C_{i}^{cr}l_{r,i}(l_{r,i} + L)\right)}{I_{i}^{z}v_{i}^{x}} \end{bmatrix}$$

#### 商用车队列控制器设计 3

### 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行 驶,稳定跟随前车和保证安全车间距离。

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 随着被控车辆速度的变化进行调整。该策略与人为 驾驶习惯接近: 高速行驶时, 增大车间距, 保证安 全性能: 低速行驶时, 减小车间距, 提高交通效率。 期望车间距定义为如下:

$$x_{i,des} = hv_i^x + d_0 \tag{11}$$

其中 $d_0$ 为静止时车辆间的安全距离,h为固定 时距,h表示车辆i在匀速行驶,车辆i通过与前车 *i*-1之间距离的时间。

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<sub>r</sub>和车间距误差x<sub>ie</sub>如 下:

因此第 i 辆车的 PID 控制输入信号为[19]:

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

定义输入输出拉普拉斯变化  $L(x_i(t)) = X_i(s)$ ,  $L(u_i(t)) = U_i(s)$ 。式(5)Laplace 变换,得传递函数:

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

## 3.2 横向控制器设计

本文使用 LOR<sup>[20]</sup>实现横向路径跟踪,设计横向 控制器结构如图4所示。其中反馈控制通过线性二 次型调节器(LQR)获得,前馈控制通过道路曲率等 公式计算。

反馈控制器设计:

基于线性系统(10), 其 LQR 控制器性能指标设 计如下:

$$J_{i}^{h} = \int_{0}^{\infty} \left(\xi_{i}^{h}\right)^{T} Q_{i}^{h} \xi_{i}^{h} + (u_{i}^{h})^{T} R_{i}^{h} (u_{i}^{h}) dt$$

$$= \int_{0}^{\infty} \left(\xi_{i}^{h}\right)^{T} (Q_{i}^{h} + K^{T} R_{i}^{h} K) \xi_{i}^{h} dt$$
(15)

通过对代价函数(15)求导,得状态反馈矩阵:

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

其中 P 满足代数 Riccati 方程:

$$(A_i^h)^T P + PA_i^h - PB_i^h (R_i^h)^{-1} B_i^{hT} P + Q_i^h = 0$$
 (17)

通过求解 Riccati 方程(17), 计算控制增益:

$$K_i^h = (R_i^h)^{-1} B^T P (18)$$

其中, $Q_i^h, R_i^h$ 为正定权重矩阵。对应的 LQR 控制律如下:

$$\delta_i^b = -K_i^h \xi_i^h \tag{19}$$

其中K<sup>h</sup><sub>i</sub>为LQR 控制器增益。



Fig.4 Lateral controller structure

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  $E_i^h \dot{\varphi}_{i,des}(t)$ ,状态量车辆横向位置误差和偏航角误差 均无法收敛至  $0^{[21]}$ ,因此本文在反馈控制器的基础 上,设计前馈控制器,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(10)改 写为:

$$\dot{\xi}_{i}^{h}\left(t\right) = A_{i}^{h}\xi_{i}^{h}\left(t\right) + B_{i}^{h}u_{i}^{h}\left(t\right) + E_{i}^{h}\dot{\phi}_{i,des}\left(t\right) + B_{i}^{h}\delta_{i}^{f}\left(t\right)(20)$$

对(20)进行 Laplace 变换,并通过终值定理,得 到系统状态量的稳态值如下:

$$e_{s} = -(A_{i}^{h} - B_{i}^{h}K_{i}^{h})^{-1}(B_{i}^{h}\delta_{i}^{f} + E_{i}^{h}v_{i}^{x}\kappa)$$
(21)

前轮转角表达式如下:

$$\begin{split} \delta_{i}^{f} &= \kappa ((C_{i}^{cf}C_{i}^{cr}a^{2} + C_{i}^{cf}C_{i}^{cr}b^{2} - C_{i}^{cf}C_{i}^{cr}b^{2}K_{i}^{h}(3) \\ &- C_{i}^{cf}Ma(v_{i}^{x})^{2} + C_{i}^{cr}Mb(v_{i}^{x})^{2} + 2C_{i}^{cf}C_{i}^{cr}ab \\ &- C_{i}^{cf}C_{i}^{cr}abK_{i}^{h}(3) + C_{i}^{cf}MaK_{i}^{h}(3)(v_{i}^{x})^{2} \\ &- C_{i}^{cf}C_{i}^{cr}LaK_{i}^{h}(3) - C_{i}^{cf}C_{i}^{cr}LbK_{i}^{h}(3))) \\ /(C_{i}^{cf}C_{i}^{cr}(a+b)) \end{split}$$
(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 控制器的总转向角如下:

$$u_i^h = \delta_i^f + \delta_i^b \tag{23}$$

# 4 Matlab/TruckSim/Prescan 联合仿真

商用车队列由一辆领航车和两辆跟随车组成。 TruckSim 提供车辆动力学模型; Matlab/Simulink 设 计控制器与实现队列控制; 如图 5 中, 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:

表1 车辆动力学参数

Table 1 Parameters of trucks	
参数名称	数值(单位)
$m_i$	18000( <i>kg</i> )
$I_i^z$	130421.8( $kg \cdot m^2$ )
$l_{f,i}$	3.5( <i>m</i> )
$l_{r,i}$	1.5( <i>m</i> )
τ	0.25( <i>m</i> )
$C_i^{cf}$	5.4225e+05 ( $N$ / $rad$ )
$C_i^{cr}$	1.0663e+06 ( $N / rad$ )

基于数字孪生的优化队列控制器参数具有高效性和可重复性。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

参数名称	数值(单位)
$k_x$	8.1
$k_v$	0.9
$d_0$	9.5( <i>m</i> )
h	0.6(s)
L	5

$Q^h_i$	diag(1000,100,1000,100)
$R_i^h$	1000



图 5 "吉林大学南岭校区" Prescan 仿真场景









工况 1一低速校园

领航车初始速度 7m/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 µ=0.85。 仿真结果如图 6-11 所示,在图 6 和图 8 中,橙黄色 曲线为领航车,红色和蓝色曲线表示两辆跟随车。

分析图 6 车辆位置和图 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 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 7m/s。在图 9 前轮转角中,跟随车前轮转角均 在物理约束范围内,最大转角约为 22deg。在图 10 横摆角偏差和图 11 横向位置误差表明,当道路曲率 发生微小变化时,车辆的横向位置误差和航向误差 也会在允许范围内发生相应的变化,但车辆均未驶 出车道边界线。

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。



图 12 "高速公路" Prescan 仿真场景

### Fig.12 ' Expressway' Prescan simulation scene





工况 2一高速公路

领航车初始速度 20m/s,高速公路干燥沥青路 面的道路附着系数设置 μ=0.85。仿真结果如图 12-18 所示。

图 12 为 prescan 仿真场景俯视图,分析图 13 车辆位置和图 14 道路曲率可知,在弯道处跟随车与 前车保持安全距离,在图 15 纵向速度中,领航车和 跟随车以 20m/s 匀速行驶。在图 16 前轮转角中,弯 道处最大转角为-8deg,最终收敛至零。在图 17 横 摆角偏差和图 18 横向位置误差在高速路况下的变 化较小,横向误差最大 0.1m,队列具有良好的控制 效果。

# 5 总结

本文设计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,孪生空间通过远程控制算法,并远 程监测车辆状态,分析两种不同的仿真场景数据。 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 生驱动的队列能实现良好的纵向跟踪性能和横向车 道保持。数字孪生提供了一个可靠的方法,用于准 确评估不同控制策略和参数的效果,并优化车辆队 列的性能。

### 参考文献

横向位置误差

[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] Dasgupta S, Rahman M, Lidbe A D, et al. A transportation digital-twin approach for adaptive traffic control systems[J]. arxiv preprint arxiv:2109.10863, 2021.

[5] 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.

[6] 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). IEEE, 2022: 705-711.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Yang X, Zheng J, Luan T H, et al. Data Synchronization for Vehicular Digital Twin Network[C]//GLOBECOM 2022-2022 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2022: 5795-5800.

[10] 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). IEEE, 2022: 705-711.

[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). IEEE, 2021: 1-6.

[12] Venkatesan S, Manickavasagam K, Tengenkai 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). IEEE, 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. IEEE, 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. SciTePress, 2004, 2: 222-229.

[21] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control[M].New York, USA: Springer Science & Business Media, 2011.