

# 控制与决策

Control and Decision

V2X环境下基于MPC算法的弯道区域CACC车队轨迹跟踪控制策略

赵红专, 吴浩, 卢宁宁, 付建胜, 许恩永, 展新, 何水龙

引用本文:

赵红专, 吴浩, 卢宁宁, 付建胜, 许恩永, 展新, 何水龙. V2X环境下基于MPC算法的弯道区域CACC车队轨迹跟踪控制策略[J]. *控制与决策*, 2024, 39(3): 975–984.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1203>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制](#)

Cooperative adaptive cruise control of connected vehicles under communication interruption  
*控制与决策*. 2021, 36(4): 933–939 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0837>

[通信中断时的网联车辆协作自适应巡航控制](#)

Cooperative adaptive cruise control of connected vehicles under communication interruption  
*控制与决策*. 2021, 36(4): 933–939 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0837>

[基于平衡鲸鱼优化算法的无人车路径规划](#)

Path planning of unmanned ground vehicle based on balanced whale optimization algorithm  
*控制与决策*. 2021, 36(11): 2647–2655 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0416>

[基于Frenet坐标系的自动驾驶轨迹规划与优化算法](#)

Trajectory planning and optimization algorithm for automated driving based on Frenet coordinate system  
*控制与决策*. 2021, 36(4): 815–824 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0748>

[基于强化学习的多目标车辆跟随决策算法](#)

Multi-objective vehicle following decision algorithm based on reinforcement learning  
*控制与决策*. 2021, 36(10): 2497–2503 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0426>

# V2X 环境下基于 MPC 算法的弯道区域 CACC 车队轨迹跟踪控制策略

赵红专<sup>1,2,3†</sup>, 吴浩<sup>1,2</sup>, 卢宁宁<sup>1,2</sup>, 付建胜<sup>1,2</sup>, 许恩永<sup>3</sup>, 展新<sup>3</sup>, 何水龙<sup>4</sup>

(1. 桂林电子科技大学广西智慧交通重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 桂林电子科技大学建筑与交通工程学院, 广西 桂林 541004; 3. 东风柳州汽车有限公司商用车技术中心, 广西 柳州 545005; 4. 桂林电子科技大学机电工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 针对 CACC (cooperative adaptive cruise control) 车队在弯道行驶的安全性和稳定性问题, 提出一种 V2X (vehicle to everything) 环境下基于 MPC (model predictive control) 算法的弯道区域 CACC 车队行驶轨迹跟踪策略. 首先, 分析 CACC 车队在弯道区域的行驶工况以及纵向平衡问题, 并基于牛顿第二定律构建车辆在弯道行驶的车辆动力学模型; 其次, CACC 车队基于 V2X 技术实现车车之间状态信息的实时交互, 并以基于车辆运动学的 MPC 算法为基础, 引入可变间距的车队安全距离控制模型, 提出一种适用于弯道区域的轨迹跟踪模型; 最后, 通过二次规划进行模型求解. 实验分析结果表明: V2X 环境下的 CACC 车队在弯道行驶过程中面对不同的行驶工况能够不同程度地保证车车之间的安全性、稳定性以及驾乘人员的舒适性, 有效验证了所提 V2X 环境下基于 MPC 算法的弯道区域 CACC 车队轨迹跟踪策略的可行性.

**关键词:** 弯道区域; CACC 车队; 轨迹跟踪; MPC; 可变间距; 二次规划

中图分类号: TP399; U491.5

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1203

**引用格式:** 赵红专, 吴浩, 卢宁宁, 等. V2X 环境下基于 MPC 算法的弯道区域 CACC 车队轨迹跟踪控制策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(3): 975-984.

## An MPC-based driving trajectory tracking control strategy of CACC fleet in curves under V2X environment

ZHAO Hong-zhuan<sup>1,2,3†</sup>, WU Hao<sup>1,2</sup>, LU Ning-ning<sup>1,2</sup>, FU Jian-sheng<sup>1,2</sup>, XU En-yong<sup>3</sup>, ZHAN Xin<sup>3</sup>, HE Shui-long<sup>4</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Intelligent Transportation System (ITS), Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 3. Commercial Vehicle Technology Center, Dongfeng Liuzhou Motor Co., Ltd., Liuzhou 545005, China; 4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** An model predictive control (MPC) algorithm based cooperative adaptive cruise control (CACC) fleet driving trajectory tracking approach is proposed under the V2X environment to address the issue of safety and stability of CACC fleet driving trajectory in the curved area. First, the driving conditions and longitudinal balance of the CACC fleet in the bend region are analyzed, and a model of vehicle dynamics based on the Newton's second law is established. Second, the CACC fleet realizes real-time interaction of state information between vehicles using V2X technology, and introduces a fleet safety distance control model with variable spacing based on the MPC algorithm of vehicle kinematics, then a trajectory tracking model for curved areas is proposed. Finally, the model is solved using quadratic programming. Analysis of the experimental results shows that the CACC fleet in a V2X environment can ensure the safety, stability, and comfort of the drivers and passengers to varying degrees while driving in the bend. It effectively verifies the feasibility of the MPC algorithm-based trajectory tracking control strategy for the CACC fleet driving in curved areas under the V2X environment.

**Keywords:** curve area; CACC fleet; trajectory tracking; model predictive control; variable spacing; secondary planning

收稿日期: 2022-07-07; 录用日期: 2022-11-10.

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB21220052); 广西科技重大专项项目(桂科 AA22068101); 柳州市科技重大专项项目(2021CAA0101); 桂林市创新平台和人才计划项目(20210217-15); 柳州市科技计划项目(2022AAA0103); 广西精密导航技术与应用重点实验室项目(DH202225).

责任编辑: 龙建成.

†通讯作者. E-mail: zhaohongzhuan@guet.edu.cn.

## 0 引言

弯道区域由于复杂的几何条件(弯曲、起伏等),交通事故率远高于普通路段<sup>[1]</sup>. 多车协同行驶是智慧交通发展的主要趋势,有利于降低道路交通事故,缓解交通压力<sup>[2]</sup>. CACC(cooperative adaptive cruise control)系统通过通信技术进行车车信息交互以及感知道路环境信息,能够使车辆之间以车队形式稳定行驶. 但是,信息交互过程中存在不可靠、不可信等因素. 文献[3]针对VANET(vehicular ad-hoc networks)中协同驾驶的信息传播问题,提出了一种基于无缝连接的信息传播机制以提升消息传输速度,提高数据传输的可靠性和有效性. 文献[4]研究车辆间通信传输延迟和丢包情况,提出了基于共识机制的车队协同控制算法,解析了车车通信与协同驾驶之间的关系. 文献[5-7]研究了通信技术在联网车辆中的作用,能够将车辆连接起来以车队形式行驶.

车队的轨迹跟踪主要以纵向控制器调节车车之间的纵向距离接近期望车距,以横向控制调整车辆的行驶方向,进而使车辆能够在指定的车道上行驶<sup>[8]</sup>. 保障多车协同驾驶的高效性,也成为众多学者的热门研究方向之一. 瑞典的哥德堡理工大学的研究团队<sup>[9]</sup>于2012年研发设计了一种基于MPC(model predictive control)算法作为CACC车队的上层控制器,实验结果表明,CACC车队的车速跟随误差小于4 m/s. MPC主要是根据当前系统的状态和未来控制量预测系统未来的输出,通过滚动优化求解实现控制目标,具有预测模型、滚动优化、反馈校正等特点,保证车辆在行驶时主动规避前方危险. MPC通过引入参考模型<sup>[10]</sup>,采用二次规划进行最优化求解,能有效处理被控模型特性和约束条件带来的影响,通过滚动优化求解寻找系统当前的最优控制量. 文献[11]针对传统MPC求解效率低的问题,提出了一种基于ADMM(alternating direction method of multipliers)的时域分解加速度求解方法,仿真结果表明,该算法有效提高了计算速度的效率,但在求解过程中增加了数值求解的迭代次数. 目前的车队轨迹跟踪方法只是基于横向、纵向控制器研究车辆行驶过程,没有结合复杂行驶工况分析车辆横向、纵向行驶状态变化,存在局限性.

V2X(vehicle to everything)是指车辆对一切事物可以进行信息交换,是无线通信技术获取信息的一种方式,对CACC系统热点问题研究具有重要的科学意义. 考虑到车辆通信对安全的影响,文献[12]为了减少影响车队安全行驶的相关类型的恶意危险,提

出了一种能够提高车队自主保护水平的协同控制策略. 文献[13]采用空间域优化CACC系统,改善了通信故障产生的影响,减少了最小安全车头时距缓冲,提高了车辆的机动性. 文献[14]利用V2I(vehicle to infrastructure)的实时特性,提出了一种基于V2I的电动汽车最优控制策略,以减少整车能耗以及加速度变化幅度,提升整车经济性与舒适性. V2X技术为解决CACC系统存在的相关科学问题提供了便利,而复杂工况对于CACC车队高效协同行驶的影响不可忽视. 在V2X环境下,如何保障CACC车队在复杂行驶工况下的安全性以及稳定性同样至关重要.

综上,目前大多数轨迹跟踪方法都是基于横向、纵向控制原理直接研究车辆行驶过程,方法往往存在局限性. 鲜有研究分析复杂行驶工况下车辆横向、纵向状态变化,车车行驶间距或过大、或过小,不能有效保障复杂工况下CACC车队协同行驶的安全性和稳定性. V2X环境下,车车之间基于V2X通信技术可以实现车车信息交互,能够为研究CACC车队协同行驶安全与稳定提供支持. 因此,本文以弯道区域为场景,基于V2X技术特性,首先,采用牛顿定律原理分析弯道区域CACC车队行驶方向上的受力状况,并建立近似受力平衡模型以保证车辆协同行驶的稳定性;其次,引入一种可变安全间距控制模型,构建基于MPC的CACC车队协同行驶轨迹跟踪模型,保障CACC车队协同行驶安全性;最后,通过二次型规划对目标函数进行最优化求解,并根据弯道区域CACC车队协同行驶的速度、车间距等约束条件进行优化求解,进而实现弯道区域CACC车队协同行驶.

## 1 CACC车队在弯道区域工况分析

弯道区域因视线受限和各种不确定因素影响车辆的行驶安全,不能快速判断前方和周围行驶环境,故采用V2X技术来获取弯道附近车辆行驶信息和道路状况. V2X技术获取的CACC车队中信息主要包括车车之间的行驶状况和车队行驶过程中周围道路环境. 其中:车车之间的信息主要指前车的加速度 $a_r$ 、速度 $v_r$ 、前车的位置 $(x_{k+1}, y_{k+1})$ ,自车的加速度 $a$ 、速度 $v$ ,以及前后两车之间的车间距 $d$ 等各种数据;道路信息主要指车辆行驶的周围环境是否安全以及弯道区域中弯道曲率、弯道半径等因素对车队在行驶过程中产生的影响. 这些信息结合V2X技术和CACC车队中的通信技术将获取的上述数据和信息传递给车辆,从而为车辆调整提供参考依据并保证CACC车队在弯道区域行驶的安全性.

### 1.1 弯道区域受力分析

为了解决多车在弯道区域协同行驶过程中因受力不均或车速过快易发生侧翻问题,需要进一步分析弯道区域特征、CACC车队协同行驶过程中的变化以及车辆在弯道区域行驶受力情况,建立动力学近似模型,保证车辆受力均衡.

选取CACC车队中的一辆车为研究目标进行受力分析,通过分析车辆行驶过程中其行驶方向上的受力来保证车辆在典型弯道行驶的平衡性.以车辆质心为原点建立直角坐标系,以车辆行驶方向为 $x$ 轴,垂直于车辆行驶方向为 $y$ 轴,如图1所示.

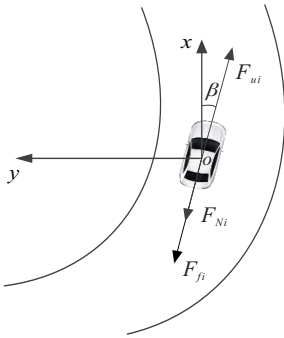


图1 以车辆为质心建立的直角坐标系

根据图1,构建如下式所示的近似模型来描述车辆在弯道区域的受力关系:

$$F_{ui} - F_{Ni} - F_{fi} = m_i a_i. \quad (1)$$

其中: $F_{ui}$ 为车辆 $i$ 行驶的牵引力,由车辆发动机提供,单位N; $F_{Ni}$ 为车辆 $i$ 在道路行驶过程中的制动力,单位N; $F_{fi}$ 为车辆 $i$ 在弯道行驶过程中存在的阻力,包括滚动阻力、摩擦力、空气阻力等各种阻力,单位N; $m_i$ 为车辆 $i$ 的质量,单位kg; $a_i$ 为车辆 $i$ 行驶过程中的加速度,单位 $m/s^2$ .

### 1.2 弯道区域道路线形分析

缓和曲线是直线与弯道之间的过渡线,为保证道路的平缓性和车辆的安全行驶,我国弯道道路线形设计标准推荐使用缓和曲线的回旋线作为直行道路与弯道之间的过渡道路.其一般由长度量纲 $A$ (m)、弯道道路半径 $R$ (m)、回旋线长度 $L_S$ (m)表示<sup>[15]</sup>,即

$$A^2 = RL_S. \quad (2)$$

同时,文献[16]根据《公路路线设计规范》制定了各级公路缓和曲线最小长度,如表1所示.《城市道路设计规范》规定了城市道路缓和曲线的最小长度,如表2所示.

缓和曲线的设置是为了使车辆慢慢适应道路的改变,减少曲率变化带来的影响,缓和车辆行驶方向变化和突然产生的离心率.但是,在行驶过程中会因

表1 各级公路缓和曲线最小长度

设计速度/(km/h)	120	100	80	60	40	30	20	
缓和曲线最小长度/m	一般值	130	120	100	80	50	40	25
	最小值	100	85	70	60	40	30	20

表2 城市道路缓和曲线最小长度

设计速度/(km/h)	80	60	50	40	30	20
缓和曲线最小长度/m	70	50	45	45	25	20

突如其来的变化使其不能按照预定的轨迹行驶,出现轨迹偏差.本文根据最短缓和曲线设计的标准为CACC车队设置合适弯道,以减少车辆行驶过程中的干扰,使车队行驶更接近真实的弯道环境.

## 2 基于MPC算法的CACC车队协同行驶跟踪建模

本文研究的CACC系统中的控制模块主要采用基于运动学MPC算法的上层控制器和基于逆驱动的下层控制模型来调整CACC车队协同行驶状态.为了研究CACC车队在弯道区域协同行驶轨迹跟踪控制策略,针对CACC车队在弯道区域协同行驶过程中车间距较大或较小的问题,在采用基于运动学的MPC算法的CACC车队协同行驶轨迹的基础上,引入了基于可变车间距的车辆安全距离控制模型,提出一种弯道区域的轨迹跟踪模型,并在CACC系统的控制模块中构建一种距离控制模式的上层控制器,最后通过二次型规划进行模型求解,同时,以车辆行驶过程中速度变化、行驶位置等参数为约束条件,保障CACC车队在弯道区域协同行驶的安全性、稳定性以及驾乘人员的舒适性.

### 2.1 基于可变车间距的安全距离模型建立

通过建立可变车头时距模型为基于CACC系统的多车协同行驶提供一个安全动态可变距离,建立CACC系统距离控制模式的上层控制器,以保证CACC车队协同行驶的安全性,提供合适的车间距.文献[17]研究不同类型的车间距对ACC系统的影响,结果表明,间距控制策略能够决定车辆行驶过程中的安全跟车间距.基于CACC系统的多车协同之间会设定一个期望车间距,并调节制动系统使车辆之间的实际距离接近期望车间距,合适的车间距不仅能够提升运行效率,更能保障车辆行驶安全.

结合文献[18-19]对车头时距的距离策略建立的相关研究,引入车辆间最小安全距离和可变间隙表示车头时距,构建如下车队协同行驶的可变间距模型:

$$S_{des}(t) = t_h v + S_0, \quad (3)$$

$$0.8 \leq t_h \leq 2.5. \tag{4}$$

其中:  $S_{des}$  为期望车间距,  $t_h$  为车头时距,  $S_0$  为最小安全距离. 车头时距的大小影响车辆间信息传递时间. 车间距过大, 信息传递较慢, 获取信息时间较长, 车辆间容易被邻车道车辆插入或发生其他交通事故; 车间距过小, 信息传递密集, 遇到突发情况易发生车辆碰撞. 因此, 本文对 CACC 车队协同行驶过程中的车头时距  $t_h$  上下限进行约束: 当  $t_h$  为固定值时, 车间距为固定时距; 当  $t_h$  为不确定时, 车间距为可变间距.

### 2.2 基于 MPC 的弯道区域 CACC 车队轨迹控制模型建立

MPC 算法具有实时应用特性以及解决多约束问题的能力, 已逐渐应用于不同领域<sup>[20]</sup>. 本文通过分析 CACC 车队在弯道区域协同行驶运动过程中的变化, 并引入可变间距的车队安全距离模型, 提出一种 CACC 车队在弯道区域协同行驶轨迹跟踪模型, 实现 CACC 车队在弯道区域的轨迹跟踪控制, 如图 2 所示.

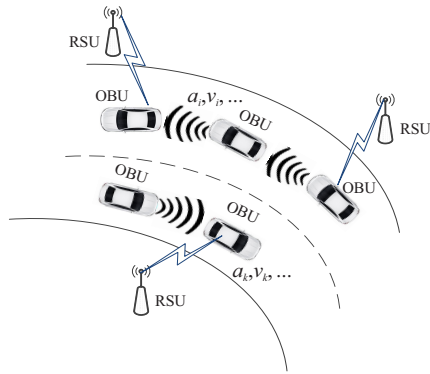


图 2 CACC 车队协同行驶轨迹

由于 CACC 系统在多车协同行驶过程中存在信息传递延迟, 采用加速度一阶惯性系统<sup>[21]</sup> 表示车辆加速度  $a$  与期望速度  $a_{des}$  之间的关系, 即

$$\dot{a} = \frac{K}{\tau}(a_{des} - a). \tag{5}$$

其中:  $\tau$  为时间常数; 同时, 选择  $K = 1$  作为系统增益. 故有

$$\dot{a} = \frac{1}{\tau}(a_{des} - a).$$

同时, 基于可变间距控制模型, 车辆在弯道行驶过程中, CACC 车队间的横向运动学特征可用下列各式表示:

$$x_{real}(t) = \int_k^{k+1} (v_r(t) - v(t)) \cos \beta dt - l, \tag{6}$$

$$x_{des}(t) = t_h v + x_k, \tag{7}$$

$$\Delta x = x_{real} - x_{des}, \tag{8}$$

$$\dot{y} = v \sin \beta, \tag{9}$$

$$\Delta v = v_r - v, \tag{10}$$

$$\dot{x} = v \cos \beta. \tag{11}$$

其中:  $\beta$  为车辆在初始时刻  $k$  的行驶方向与横向之间的夹角,  $x_{real}$  为前后两车之间的真实间距,  $v_r$  为车队中前车行驶速度,  $v$  为本车行驶速度,  $t$  为车辆在时刻  $k + 1$  与起始时刻  $k$  之间的时间差值,  $l$  为车辆的车身长度,  $\Delta x$  为车辆之间的距离误差,  $\Delta v$  为前后车辆之间的速度差. 根据式 (5)~(8) 可得下列各式:

$$\Delta \dot{x} = v_{real} \cos \beta - a t_h, \tag{12}$$

$$\Delta \dot{v} = a_r - a, \tag{13}$$

$$\dot{a} = \frac{a_{des}}{\tau} - \frac{a}{\tau}. \tag{14}$$

由式 (12)~(14) 可得车辆横向运动的连续状态方程, 即

$$\dot{x} = Ax + Bu, \tag{15}$$

$$\dot{y} = Cx. \tag{16}$$

因此, 定义该系统的状态向量为  $x = [\Delta x \ v_{real} \ a_r]^T$ , 系统控制输入向量为  $u = [a_{des} \ a]^T$ , 系统输出向量  $Y = [\Delta x \ v_{real} \ a_r]^T$ ;  $A$  为状态估计,  $B$  为控制输入,  $C$  为输出矩阵. 同时, 采用泰勒展开式将式 (12)~(14) 展开求解, 具体系数如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & t_h \\ 0 & -1 \\ \frac{1}{\tau} & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

利用前项欧拉将式 (15) 和 (16) 离散化, 可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}(k+1) = \frac{x(k+1) - x(k)}{T} = Ax(k) + Bu(k), \\ \dot{y}(k+1) = \frac{y(k+1) - y(k)}{T} = Cx(k). \end{cases} \tag{17}$$

整理可得

$$\begin{cases} \dot{x}(k+1) = (TA + E)x(k) + (BT)u(k), \\ \dot{y}(k+1) = C(T + E)x(k). \end{cases} \tag{18}$$

同时, 令

$$\begin{cases} \dot{x}(k+1) = \tilde{A}x(k) + \tilde{B}u(k), \\ \dot{y}(k+1) = \tilde{C}x(k). \end{cases} \tag{19}$$

其中

$$\tilde{A} = (TA + E) = \begin{bmatrix} 0 & T \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{B} = TB = \begin{bmatrix} 0 & -Tt_h \\ 0 & -T \\ T/\tau & -T/\tau \end{bmatrix},$$

$$\tilde{C} = C(T + E) = \begin{bmatrix} T + 1 & 0 & 0 \\ 0 & T + 1 & 0 \\ 0 & 0 & T + 1 \end{bmatrix}.$$

### 2.3 基于二次规划的模型求解

通过基于运动学的MPC算法,将CACC系统的输出状态离散化后进行模型预测、状态估计,实现CACC系统中控制模块的滚动优化.控制模块在实现最优化过程中,采用二次型规划将基于运动学的MPC算法进行最优化求解,将状态方程离散后进行预测<sup>[21]</sup>.其中

$$X_k = \begin{bmatrix} x(k/k) \\ x(k+1/k) \\ x(k+2/k) \\ \vdots \\ x(k+N/k) \end{bmatrix}, U_k = \begin{bmatrix} u(k/k) \\ u(k+1/k) \\ u(k+2/k) \\ \vdots \\ u(k+N/k) \end{bmatrix}.$$

$x(k+i/k)$ 表示在 $k$ 时刻对 $k+i$ 时刻的预测, $N$ 为预测区间.由式(19)可知,系统输出状态为

$$Y(k+1) = \tilde{C}x(k).$$

于是,根据系统的输入预测系统新的状态空间方程的输出,即

$$\begin{cases} Y(k) = \tilde{C}x(k), \\ Y(k+1) = \tilde{C}x(k+1) = \tilde{C}\tilde{A}x(k) + \tilde{C}\tilde{B}u(k), \\ Y(k+2) = \tilde{C}x(k+2) = \\ \tilde{C}\tilde{A}^2x(k) + \tilde{C}\tilde{A}\tilde{B}u(k) + \tilde{C}\tilde{B}u(k+1), \\ Y(k+3) = \tilde{C}x(k+3) = \\ \tilde{C}\tilde{A}^3x(k) + \tilde{C}\tilde{A}^2\tilde{B}u(k) + \tilde{C}\tilde{A}\tilde{B}u(k+1) + \\ \tilde{C}\tilde{B}u(k+2), \\ \vdots \\ Y(k+N_p) = \tilde{C}x(k+N_p) = \\ \tilde{C}\tilde{A}^N x(k) + \tilde{C}\tilde{A}^{N_p-1}\tilde{B}u(k) + \dots + \\ \tilde{C}\tilde{B}u(k+N_p-1). \end{cases} \quad (20)$$

将式(20)用矩阵表示,可简化为

$$\xi(k+1) = \Psi X(k) + \Theta U(k). \quad (21)$$

其中

$$\xi(k) = \begin{bmatrix} Y(k+1) \\ Y(k+2) \\ \vdots \\ Y(k+N_c) \\ \vdots \\ Y(k+N_p) \end{bmatrix}, \Psi = \begin{bmatrix} \tilde{C}\tilde{A} \\ \tilde{C}\tilde{A}^2 \\ \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_c} \\ \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_p} \end{bmatrix},$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \tilde{C}\tilde{B} & 0 & \dots & 0 \\ \tilde{C}\tilde{A}\tilde{B} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_c}\tilde{B} & \tilde{C}\tilde{A}^{N_c-1}\tilde{B} & \dots & \tilde{C}\tilde{A}\tilde{B} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}\tilde{A}^{N_p-1}\tilde{B} & \tilde{C}\tilde{A}^{N_p-2}\tilde{B} & \dots & \tilde{C}\tilde{A}^{N_p-N_c-1}\tilde{B} \end{bmatrix},$$

$$U(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+N_c) \end{bmatrix},$$

$N_p$ 为预测步长, $N_c$ 为控制步长.根据以上推导,令参数输出向量为

$$Y_{\text{ref}}(k) = \begin{bmatrix} y(k+1) \\ y(k+2) \\ \vdots \\ y(k+N_p) \end{bmatrix}, e = Y - Y_{\text{ref}}.$$

将式(20)和(21)整合,可得输出系统的代价函数

$$\begin{aligned} J = & \sum_{i=0}^{N-1} e(k+i/k)^T Q e(k+i/k) + \\ & U_k(k+i/k)^T R U_k(k+i/k) + \\ & e(k+N)^T F e(k+N) = \\ & (\Psi X(k) + \Theta U(k) - Y_{\text{ref}})^T Q (\Psi X(k) + \\ & \Theta U(k) - Y_{\text{ref}}) + U^T R U = \\ & (\Psi X(k) + \Theta U(k))^T Q (\Psi X(k) + \\ & \Theta U(k) - Y_{\text{ref}}) - (Y_{\text{ref}})^T Q (\Psi x(k) + \\ & \Theta u(k) - Y_{\text{ref}}) + U^T R U = \\ & X_k^T G X_k + 2X_k^T E U_k + U_k^T H U_k - \\ & (Y_{\text{ref}})^T Q (\Psi X(k) + \Theta U(k) - Y_{\text{ref}}). \quad (22) \end{aligned}$$

其中: $G = \Psi^T Q$ ,  $E = \Theta^T Q \Psi$ ,  $H = \Theta \Theta^T Q \Theta + R$ ,  $Q$ 、 $R$ 为调节矩阵( $Q$ 为期望轨迹的加权矩阵, $R$ 为控制输入的加权矩阵).

假设参考输出矩阵  $Y_{ref}(k) = 0$ , 则新的代价函数为

$$J = X_k^T G X_k + 2X_k^T E U_k + U_k^T H U_k. \quad (23)$$

### 2.4 基于MPC算法的目标函数最优优化

综上所述, 基于CACC车队运动学的MPC在二次规划过程中求得  $J = X_k^T G X_k + 2X_k^T E U_k + U_k^T H U_k$  最优解即可, 同时, 车辆行驶速度需要满足  $u_{min}(k) \leq u(k) \leq u_{max}(k)$ . 故目标函数的最优化为

$$\min X_k^T G X_k + 2X_k^T E U_k + U_k^T H U_k. \quad (24)$$

同时, 满足如下约束条件:

$$\text{s.t.} \begin{cases} u_{min}(k) \leq u(k) \leq u_{max}(k), \\ U_{min}(k) \leq U(k) \leq U_{max}(k), \forall k \geq 0. \\ x_{min}(k) \leq x(k) \leq x_{max}(k), \end{cases} \quad (25)$$

通过转化为二次规划求解, 得到控制时域内的控制输入增量为

$$\Delta U(k) = [\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(N_c - 1)]^T. \quad (26)$$

根据MPC的基本控制原理, 将该控制序列的第1个元素作为实际的控制输入增量用于系统, 即  $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$ . CACC系统利用这一时刻的控制量预测下一时刻; 在新的时刻, 控制系统输入状态信息, 重新预测下一段时域的输出, 通过滚动优化过程得到一个新的控制增量序列. 如此循环往复, 直至系统完成控制过程.

## 3 仿真与分析

本节主要通过CarSim和Simulink联合仿真验证弯道区域CACC车队协同行驶轨迹跟踪控制策略的合理性和有效性. 首先, 在CarSim中设置CACC车队行驶环境, 包括弯道场景的构建(见1.2节的弯道区域线形分析)、车辆传感器设置、车辆类型选择以及相关动力学模型(见本文弯道区域的近似受力模型)等.

仿真选择的车辆类型为D-class, 并利用V2X通信技术将3辆ACC车辆组成CACC车队. 同时在Simulink中选择MPC控制器, 根据基于运动学的MPC算法调试控制器, 并将CarSim中的车辆与此相连建立ACC车辆. 在此过程中利用通信技术将3辆ACC车辆连接, 建立CACC系统, 实现CACC车队的上层控制、下层制动驱动交替工作. 其上层控制器接收CarSim中传感器获取的车辆信息和通信时延等周围环境信息, 并依据基于运动学的MPC算法控制CACC车队协同行驶轨迹. 最后, 通过Matlab实现基于MPC算法的CACC车队协同行驶过程, 并在

Simulink中建立真实复杂的CACC系统, 使用模型预测工具箱对建立的CACC车队进行测试与优化.

### 3.1 CACC车队协同行驶工况仿真分析

仿真实验通过设置不同工况分析基于运动学的MPC算法的轨迹跟踪方法在弯道区域协同行驶的可行性. 首先对CACC车队的首车加速度进行设置, 变化值包含加速、匀速、减速3种行驶工况, 具体参数设置如表3所示. 进而根据首车加速度变化分析跟随车辆行驶特性变化和CACC车队在弯道区域协同行驶特性.

表3 仿真参数设置(1)

仿真时间 $t/s$	首车加速度 $a/(m/s^2)$	CACC车队行驶状态
$0 \leq t < 10$	2	加速行驶
$10 \leq t < 20$	0	匀速行驶
$20 \leq t < 30$	-1	减速行驶
$30 \leq t < 40$	0	匀速行驶
$40 \leq t < 50$	2	加速行驶
$50 \leq t < 80$	1	加速行驶
$80 \leq t < 100$	0	匀速行驶

首先, 通过CACC车队在弯道区域协同行驶过程中的加速度、速度、行驶位置、车间距等参数变化评价基于运动学的MPC算法的轨迹跟踪控制策略的可行性和合理性. 主要通过对比CACC车队的车间距与期望车间距判断协同行驶的稳定性, 通过CACC车队的加速度变化判断驾乘人员的舒适性; 根据速度和加速度变化曲线分析CACC车队协同行驶的稳定性、舒适性, 依据车间距变化趋势和行驶位置分析CACC车队协同行驶的安全性、稳定性. 仿真结果如图3~图7所示.

图3为CACC车队中各个车辆跟随首车行驶的加速度变化曲线, 图中显示车辆2和车辆3的加速度跟随首车设置的加速度变化而变化, 但加速度在某个范围内存在突变点. 图4为CACC车队中各个车辆对应的速度变化曲线, 车辆2、车辆3围绕首车速度进行变化, 紧跟首车速度协同行驶. 图5为CACC车队中各个车辆所对应的行驶位置变化曲线, 整个仿真

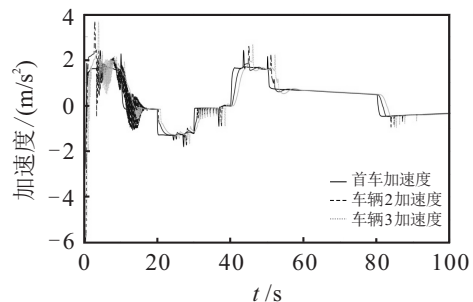


图3 CACC车队协同行驶加速度变化曲线(1)

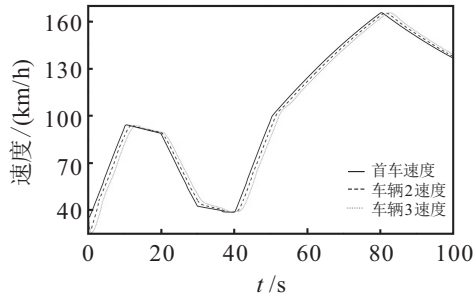


图4 CACC车队协同行驶速度变化曲线(1)

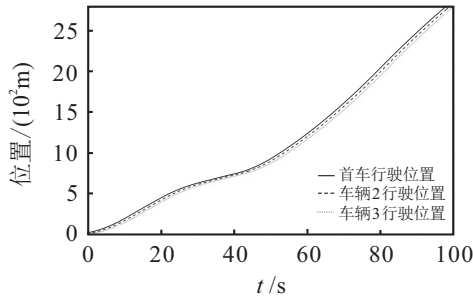


图5 CACC车队协同行驶位置变化曲线(1)

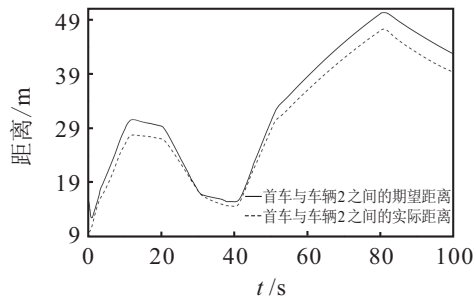


图6 首车与车辆2之间距离变化曲线(1)

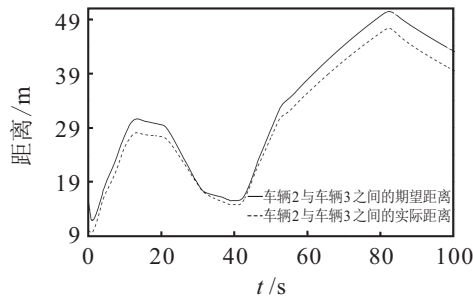


图7 车辆2与车辆3之间距离变化曲线(1)

过程中各车的行驶位置变化曲线一致,各车的行驶位置曲线相对平行.图6表示首车与车辆2之间的期望车间距与实际车间距的变化曲线,整个仿真过程中实际车间距小于期望车间距,甚至在30s附近接近于期望车间距.图7表示车辆2与车辆3之间的期望车间距与实际车间距的变化曲线,同图6中车间距曲线变化趋势一致.随着CACC车队协同行驶状态的改变,自车与前车之间的实际车间距小于期望车间距,在[25,35]s内实际车间距最接近于期望车间距,甚至达到期望车间距.

图3中的加速度在仿真时间接近20s时趋于稳定,但是在加速度恒定过程中出现了突变,由此推断可能是获取的行驶数据存在噪声或者通信延迟等因素的干扰才会使加速度产生突变.整体而言,加速度变化范围在 $[-2,2]$  m/s<sup>2</sup>时可以保障驾乘人员的舒适性.图4、图5中各车辆的速度、行驶位置变化曲线几乎平行,反映了CACC车队协同行驶过程中车辆之间的稳定性.图6、图7中实际车间距紧跟期望车间距,且未超过期望车间距,表明CACC车队中各车之间的距离一直处于安全的车间距,保障了CACC车队协同行驶的安全性、稳定性.

为进一步验证在MPC方法的基础上,通过引入可变车间距控制方式,能够提升弯道区域CACC车队协同行驶的安全性,以车车间距为衡量指标,与传统的MPC方法进行对比,其结果如图8所示.

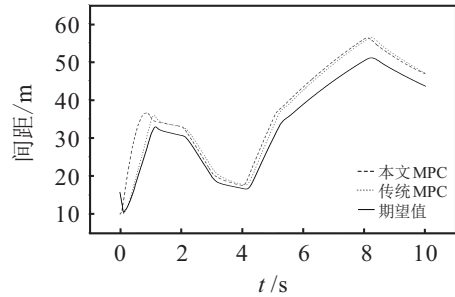


图8 本文MPC与传统MPC的车车间距对比

图8表示分别将本文的MPC方法与传统MPC方法的车辆1和车辆2在实验过程中的实际间距与期望间距进行对比.结果表明:在实验初期,利用本文MPC方法进行轨迹跟踪,车车间距大于期望间距,而传统MPC低于期望间距;随着时间的推移,本文MPC和传统MPC都会高于期望安全间距,但本文的MPC控制策略相比于传统MPC控制策略,其车车间距更加接近于期望间距.这表明在MPC方法中通过引入可变车间距控制方式,有利于提升CACC车队协同行驶过程的安全性和效率性.

### 3.2 首车加减速交替工况仿真分析

为了研究CACC车队协同行驶过程中不断变化的加速度对跟随车辆行驶特性的影响,CACC车队行驶过程中将首车的期望加速度的变化值进一步设置为正弦函数,通过不断变化的加速度研究CACC车队在行驶过程中的状态变化.鉴于文献[22]将车车间距通信时延设为20ms,本文仿真过程也将通信时延设置为20ms,具体仿真实验参数设置如表4所示.

根据不同工况下CACC车队在行驶过程中遇到突发状况时,其行驶特性(加速度、速度、位置、车间距等)如何变化,在遇到前方车辆突发状况时所做出

表4 仿真参数设置(2)

参数	参数值
通讯时延/ms	20
初始速度/(km/h)	40
期望加速度/(m/s <sup>2</sup> )	sin(0.3t)
仿真采样间隔/s	0.01
仿真步长/s	100

的反应是否符合CACC车队在弯道区域行驶,通过CACC车队的这些表现对其进行综合分析,从而研究CACC系统中关键因素对CACC车队安全、稳定、舒适行驶的规律,仿真结果如图9~图13所示。

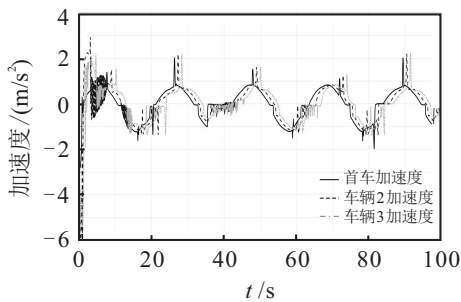


图9 CACC车队协同行驶加速度变化曲线(2)

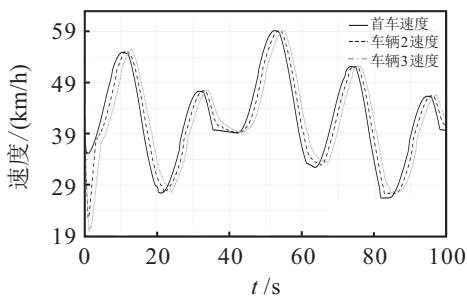


图10 CACC车队协同行驶速度变化曲线(2)

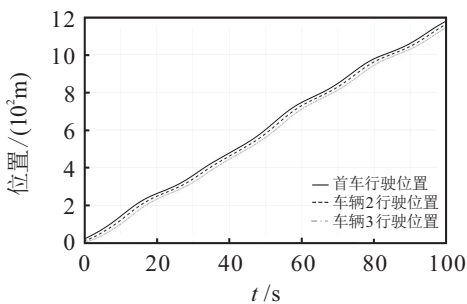


图11 CACC车队协同行驶位置变化曲线(2)

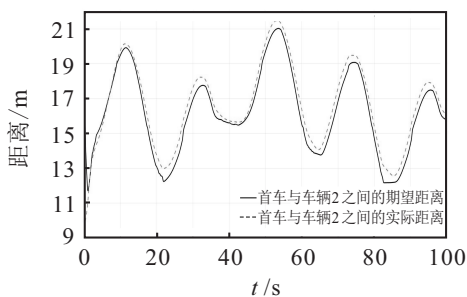


图12 首车与车辆2之间距离变化曲线(2)

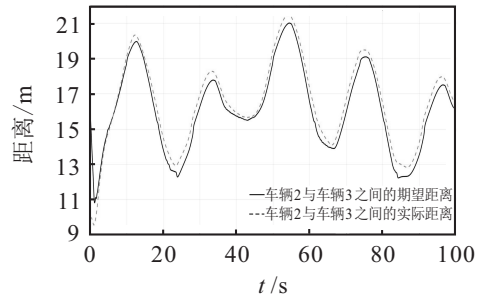


图13 车辆2与车辆3之间距离变化曲线(2)

图9为CACC车队中各个车辆跟随首车行驶的加速度变化曲线,图中显示车辆2和车辆3的加速度跟随首车设置的加速度变化而变化,前10s,CACC车队加速度波动较大,可能与车车之间信息传递存在通信时延有关.图10为CACC车队中各个车辆所对应的速度变化曲线,车辆2、车辆3围绕首车速度进行变化,紧跟首车速度协同行驶.图11为CACC车队中各个车辆所对应的行驶位置变化曲线,整个仿真过程中各车的行驶位置变化曲线一致,各车的行驶位置曲线相对平行.图12表示首车与车辆2之间的期望车间距与实际车间距的变化曲线,整个仿真过程中实际车间距大于期望车间距.图13表示车辆2与车辆3之间的期望车间距与实际车间距的变化曲线,同图11中车间距曲线变化趋势一致。

图9中的加速度在仿真时间约为20s时趋于稳定,但是在加速度刚开始过程中出现了突变,整体而言,加速度变化范围在[-2,2]m/s<sup>2</sup>时可以保障驾乘人员的舒适性.图10和图11中车辆的速度、行驶位置变化曲线几乎平行,反映了CACC车队协同行驶过程中车辆之间的稳定性.图12、图13中实际车间距紧跟期望车间距,且超过期望车间距,表明CACC车队中各车之间的距离虽然稳定在一定的距离内,但是超过了期望车间距,具有一定的风险。

### 3.3 CACC车队协同行驶不同工况仿真分析

通过CACC车队中各车加速度变化与设定的期望加速度对比可知,首车加速度未按照设定的加速度数值行驶并小于期望值,且车辆2、车辆3的加速度在整个减速期间并不稳定,但是各车速度值变化曲线接近平行,实际车间距逐渐接近期望车间距.总之,各车加速度在[-2,2]m/s<sup>2</sup>区间内变化时,舒适性得到了保障,但是车辆加速度大幅度震荡,这可能与跟随车辆获取首车信息存在时延有关,车辆稳定性有待提高.通过仿真基于运动学的MPC算法的CACC车队在弯道区域协同行驶过程中的变化,设计加速、匀速、减速以及不断变化的加速度几种典型工况来分

析跟随车辆是否按照首车设定的工况行驶. 虽然在不同工况中, 跟随车辆的加速度刚开始都在首车加速度值上下波动, 各车加速度值小于设定的加速度值, 产生的波动可能是车车之间信息传递延迟所致, 在减速工况下, 加速度波动最小, 但是, 在3种工况的最后时刻, 其加速度都稳定在 $[-2, 2] \text{ m/s}^2$ 区间, 从而保证了CACC车队协同行驶过程中驾乘人员的舒适性. 在加速、减速、匀速3种工况下, CACC车队中车间距都保持在一定的间距内, 实际车间距随期望车间距的变化而变化且小于期望车间距, 但是, 在不断变化的加速度工况下, CACC车队中车车之间的实际车间距都大于期望车间距, 这可能与加速度变化波动有关. 整体而言, 车车之间的距离具有相同的变化幅度, 保障了CACC车队协同行驶的稳定性.

#### 4 结论

本文基于CACC车队在弯道区域协同行驶过程中建立的车辆直角坐标系, 简化了车辆受力分析, 采用牛顿定理分析车辆的受力平衡, 以保障车辆在行驶过程的平衡性; 同时横向建立了CACC系统上层控制器可变间距控制模式, 采用基于运动学的MPC算法研究CACC车队协同行驶轨迹, 并通过CarSim和Simulink联合仿真进行了验证. 仿真结果表明, 基于运动学的MPC算法能够规划CACC车队在弯道区域协同行驶轨迹, 保障了CACC车队协同行驶的安全性、跟车稳定性以及驾乘人员的舒适性. 本文主要通过研究车辆在弯道区域行驶过程中受力情况和运动学之间的关系, 采用动力学模型分析车辆受力平衡以保障车辆行驶的稳定性, 并在此基础上提高了车辆行驶效率, 改善了行驶环境, 为未来V2X环境下的实车测试奠定了基础. 下一步工作将考虑车车通信和更多的行驶工况对CACC车队行驶轨迹的影响, 不再局限于单个影响因素, 进一步优化CACC车队在弯道区域的行驶过程.

#### 参考文献(References)

[1] Peden M M. World report on road traffic injury prevention[M]. Geneva: World Health Organization, 2004.

[2] Coelingh E, Solyom S. All aboard the robotic road train[J]. IEEE Spectrum, 2012, 49(11): 34-39.

[3] Zhao H Z, Yue H, Gu T L, et al. Low delay and seamless connectivity-based message propagation mechanism for VANET of VCPS[J]. Wireless Personal Communications, 2021, 118(4): 3385-3402.

[4] Jia D Y, Ngody D. Platoon based cooperative driving

model with consideration of realistic inter-vehicle communication[J]. Transportation Research — Part C: Emerging Technologies, 2016, 68: 245-264.

- [5] Bian Y G, Zheng Y, Ren W, et al. Reducing time headway for platooning of connected vehicles via V2V communication[J]. Transportation Research — Part C: Emerging Technologies, 2019, 102: 87-105.
- [6] Qin W B, Orosz G. Experimental validation of string stability for connected vehicles subject to information delay[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020, 28(4): 1203-1217.
- [7] Li Y F, Chen W B, Peeta S, et al. Platoon control of connected multi-vehicle systems under V2X communications: Design and experiments[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(5): 1891-1902.
- [8] 廖涛. 考虑车辆动力学的V2V车辆队列模型预测控制[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.  
(Liao T. Predictive control of V2V vehicle platoon model considering vehicle dynamics[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.)
- [9] Kianfar R, Augusto B, Ebadighajari A, et al. Design and experimental validation of a cooperative driving system in the grand cooperative driving challenge[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(3): 994-1007.
- [10] Liu K, Gong J W, Chen S P, et al. Model predictive stabilization control of high-speed autonomous ground vehicles considering the effect of road topography[J]. Applied Sciences, 2018, 8(5): 822.
- [11] 孙浩, 杜煜, 卜德旭, 等. 汽车轨迹跟踪模型预测控制的加速求解方法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2020, 47(10): 19-25.  
(Sun H, Du Y, Bu D X, et al. Accelerated solution method for vehicle trajectory tracking based on model predictive control[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2020, 47(10): 19-25.)
- [12] Petrillo A, Pescapé A, Santini S. A collaborative approach for improving the security of vehicular scenarios: The case of platooning[J]. Computer Communications, 2018, 122: 59-75.
- [13] Zhang Y, Bai Y, Wang M, et al. Cooperative adaptive cruise control with robustness against communication delay: An approach in the space domain[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(9): 5496-5507.
- [14] 朱波, 吴迪, 张农, 等. 基于滚动优化和能量回收的V2I电动汽车决策[J]. 控制与决策, 2020, 35(4): 956-964.  
(Zhu B, Wu D, Zhang N, et al. Decision-making research

- of V2I electric vehicle based on rolling optimization and energy recovery[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(4): 956-964.)
- [15] 金辉. 智能汽车坡道和弯道的控制[M]. 北京: 科学出版社, 2019.  
(Jin H. Control of ramps and curves in smart cars[M]. Beijing: Science Press, 2019.)
- [16] 杨少伟, 等. 道路勘测设计[M]. 第3版. 北京: 人民交通出版社, 2009.  
(Yang S W, et al. Road survey and design[M]. The 3rd edition. Beijing: China Communications Press, 2009.)
- [17] 黄颖. 考虑时滞的ACC间距控制策略对车队稳定性的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.  
(Huang Y. Study on the effect of ACC distance control strategy on platoon string stability considering time delay[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.)
- [18] 张亭. 基于MPC算法的汽车自适应巡航系统仿真与分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.  
(Zhang T. Simulation and analysis of vehicle adaptive cruise control system based MPC algorithm[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.)
- [19] 李静. 复合电源驱动电动车巡航系统优化算法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.  
(Li J. Study on optimization algorithm for hybrid electric power system used in electric vehicles cruise control[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.)
- [20] Wang H, Huang Y J, Khajepour A. Cyber-physical control for energy management of off-road vehicles with hybrid energy storage systems[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(6): 2609-2618.
- [21] 龚建伟, 刘凯, 齐建永. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 第2版. 北京: 北京理工大学出版社, 2020.  
(Gong J W, Liu K, Qi J Y. Model predictive control for self-driving vehicles[M]. The 2nd edition. Beijing: Beijing Insitute of Technology Press, 2020.)
- [22] Roger S, Martín-Sacristán D, Garcia-Roger D, et al. Low-latency layer-2-based multicast scheme for localized V2X communications[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(8): 2962-2975.

### 作者简介

赵红专(1985—), 男, 副教授, 博士, 从事智慧交通系统、交通信息及控制、智能网联汽车等研究, E-mail: zhaohongzhan@guet.edu.cn;

吴浩(1997—), 男, 硕士生, 从事智能交通系统、交通信息及控制等研究, E-mail: wh19970816@163.com;

卢宁宁(1996—), 女, 硕士, 从事智慧交通系统、交通信息及控制等研究, E-mail: 19152202006@mails.guet.edu.cn;

付建胜(1977—), 男, 高级工程师, 博士, 从事交通大数据、交通信息工程及控制等研究, E-mail: 20251996@qq.com;

许恩永(1982—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事整车系统设计的研究, E-mail: 13557729070@163.com;

展新(1979—), 男, 正高级工程师, 硕士, 从事整车系统设计的研究, E-mail: zhanx@dfzm.com;

何水龙(1983—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能驾驶、数据融合、智能决策与控制、汽车振动控制等研究, E-mail: xiaofeilonghe@163.com.