

考虑通信延时的platoon跟车控制模型

于冲[†], 赵海, 司帅宗, 朱剑

(东北大学 计算机科学与工程学院, 沈阳 110169)

摘要: 自主巡航控制与车载自组织网络是形成 platoon 的两项关键技术. 自主巡航控制为车辆自动驾驶提供支持, 车载自组织网络使车辆间通信成为可能. 以往的研究通常将 platoon 中的通信与控制分开讨论, 忽略了两者之间的内在联系, 造成在通信不理想的情况下 platoon 的跟车控制效果不佳的结果. 对此, 分别建立 platoon 结构模型与通信模型, 分析通信与控制的相互作用, 并在 IDM(Intelligent driver model) 模型的基础上增加加权约束规则和信息预估策略, 提出一种弥补通信延时影响的改进跟车控制模型, 期望降低通信延时对 platoon 的影响作用, 提升 platoon 的整体性能. 在 SUMO、OMNeT++ 及 VEINS 联合搭建的 platoon 仿真平台上对模型性能进行评估, 实验结果表明, 在存在通信延时的场景下改进跟车模型可以有效提升 platoon 的稳定性和安全性.

关键词: platoon; 车辆间通信; 延时; 跟车控制; 加权约束; 信息预估

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Vehicle following control model of platoon considering communication delay

YU Chong[†], ZHAO Hai, SI Shuai-zong, ZHU Jian

(College of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China)

Abstract: Adaptive cruise control and vehicle ad-hoc network are two key technologies of platoon. Adaptive cruise control provides support for automatic drive, and vehicle ad-hoc network makes inter-vehicle communication possible. In previous research, communication and control of platoon are discussed separately and these studies always overlooked links between the two. As a result, platoon's vehicle-following control is ineffective in non-ideal communication scenario. In this paper, a structure model and a communication model of platoon are established respectively and the interaction between communication and control is analyzed. By adding weighted constraint scheme and information prediction strategy on the intelligent driver model (IDM), we present an improved vehicle-following control model that compensates for the influence of communication delay, expecting to reduce the effect of communication delay on platoon and improving the performance of platoon. The performance of the model is evaluated on a simulation platform built by SUMO, OMNeT++ and VEINS. The experiment results show that the improved model can effectively increase stability and safety of platoon under the situation of communication delay.

Keywords: platoon; vehicle communication; delay; vehicle-following control; weighted constraint; information prediction

0 引言

近年来,交通拥堵已成为人们普遍关注且亟待解决的热点问题^[1]. 为了解决现有的交通问题,platoon 的概念应运而生. Platoon 指的是一系列具有自动驾驶技术与车辆间通信能力的车辆组成的行驶队列,它的应用能够大幅缓解交通拥堵,提高道路容量,降低能源消耗,提升驾驶安全,改善乘车体验^[2-3].

目前,对 platoon 的研究主要分为两大类. 一类是从网络研究入手分析 platoon 的通信性能,如:文献[4]

提出了理想环境下多个 platoon 之间通信性能的分析方法,研究表明,platoon 间的通信性能取决于车辆在 platoon 中的角色以及它所在 platoon 中的位置;文献[5]针对 platoon 的通信过程中存在误码率、数据包非饱和等情况,对非理想环境下多个 platoon 之间的通信性能进行了分析;文献[6]从 platoon 模式下 VANET 网络连通性入手,提出一种连通性感知的 MAC 协议. 另一类则重点关注车辆控制方法的设计与建模,如:文献[7]从宏观的角度研究 platoon 的动态特性,提

收稿日期: 2017-08-21; 修回日期: 2017-12-29.

基金项目: 国家重大科技创新项目(02190022117021).

作者简介: 于冲(1991—),女,博士生,从事车载网、复杂网络的研究;赵海(1959—),男,教授,博士生导师,从事复杂网络、车载网、医学图像、体域网等研究.

[†]通讯作者. E-mail: 1179710249@qq.com.

出了一种干扰自适应 platoon 控制架构,在此结构中, platoon 控制器能够适应干扰场景;文献[8]提出了基于积分滑动控制模型的车辆分布式控制策略,该控制策略对间距误差幅度给出了很好的限制;文献[9]提出了控制 platoon 头车间距恒定的思想,有效降低了 platoon 之间的相互影响,提升了 platoon 的稳定性。

Platoon 中车辆的控制模块经由 VANET 获取控制输入,通信中存在的不足必然威胁到 platoon 的稳定与安全,其中通信延时的存在对 platoon 的影响最为严重^[10]。然而,上述研究均忽视了车辆控制与通信之间内在联系。控制和通信作为 platoon 得以实现的两个关键部分,只针对通信或控制单方面研究得出的结果与实际是相背离的。因此,本文从车辆控制与通信的关联入手,在 IDM 模型的基础上增加加权约束和信息预测策略,提出一种改进跟车模型,旨在提升非理想通信场景下 platoon 的稳定性和安全性。

1 Platoon 系统架构

1.1 Platoon 结构模型

Platoon 结构模型如图 1 所示。根据车辆在道路中的位置可以将车辆划分为 4 种类型,分别是:头车(Leader vehicle),尾车(Tail vehicle),成员车辆(Member vehicle),自由车辆(Free vehicle)。

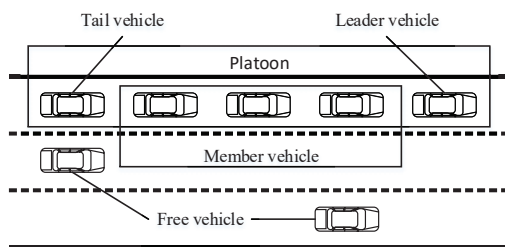


图 1 Platoon 结构模型

1) 头车:通常指 platoon 中的第 1 辆车,它是整个 platoon 的控制中心,其他车辆均跟随头车行驶,它在智能交通系统的协调下创建和管理 platoon,控制 platoon 内部的成员车辆的驾驶行为,并在同一个 platoon 中进行信息的收集和传播;2) 尾车:指 platoon 中的最后一辆车,它是 platoon 间通信的重要枢纽,负责与下一个 platoon 中的头车建立通信;3) 成员车辆:Platoon 中除了头车和尾车以外的其他车辆均被定义为成员车辆,它们跟随头车行驶;4) 自由车辆:不属于任何 platoon 的车辆被称为自由车辆,自由车辆可以根据自己的需求随时选择加入 platoon。

Platoon 中车辆的行为不仅取决于驾驶者的个人意愿,还要受到 platoon 控制中心的统一调度与约束。当驾驶者根据自身的需求需要调整驾驶行为时,

成员车辆会将这一信息传递给 platoon 头车,头车根据当前的交通情况作出判断,头车同意成员车辆的请求以后, platoon 中的所有车辆根据实际情况作出相应的调整,以维持整个 platoon 的平稳运行。

1.2 Platoon 通信模型

Platoon 运行过程中,车辆彼此之间需要进行频繁可靠的控制信息交换。所传递的信息可以分为两类:一类是控制信息,包括车辆的驾驶行为、道路交通状况以及事故预警等信息;另一类是非控制信息,包括车辆之间共享的媒体、娱乐和办公等服务于乘客体验的应用信息。Platoon 的稳定性和安全性与控制信息的传递有着密切的联系,因此,本文重点关注 platoon 中控制信息的传输,并提出 platoon 的通信模型。

Platoon 中所有车辆的行为都直接或间接地受到头车的影响,而且必须保障头车具备与同一 platoon 中任意车辆建立通信的条件,因此,头车的通信范围需要覆盖整个 platoon。由于车辆的通信范围有限, platoon 中的车辆数目不能过多。车辆之间通信采用专门面向车载网的 IEEE802.11p 协议,所有控制信息的传输均在控制信道中进行,并使用 CSMA/CA 机制随机竞争信道接入。Platoon 的头车可以向 platoon 中的任意一辆车发送信息, platoon 中的成员车辆只向其相邻的后方车辆发送控制信息,当邻近的两个 platoon 之间需要进行通信时,前方的 platoon 头车会先将信息传输给尾车,再经由尾车转发给下一个 platoon 的头车。

2 Platoon 跟车控制

2.1 IDM 控制模型

跟车控制模型存在的意义是保证车辆之间驾驶行为一致。基于刺激-反应方法建立的 IDM(Intelligent driver model)模型^[11]是一个被普遍认可且广泛应用的车辆协同控制模型。作为一种确定性的移动模型,其加速度是一个连续函数。IDM 模型的特别之处在于,除了车辆速度和车辆间距以外,它还将速度差作为一个输入参数,这在真实驾驶环境中起到了非常重要的稳定作用,尤其在交通拥堵的环境下,能够根据周围环境的变化合理调整自身运动状态以达到避免碰撞的目的。IDM 控制模型包含期望安全间距 s^* 和跟随车辆加速度 $\frac{dv}{dt}$ 两个部分,模型函数为

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + vT_0 + \frac{v \cdot \Delta v}{2\sqrt{ab}}, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4 - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

其中: s_0 为静止时车辆之间的距离, v 为跟随车辆的速度, T_0 为相邻车辆的期望时距, Δv 为跟随车辆与前面车辆的速度差, a 为车辆能够达到的加速度极限, b 为适宜的减速度, v_0 为车辆允许达到的最大速度, s 为两车之间的实际间距.

2.2 基于IDM的改进跟车模型

针对现有的跟车模型忽视通信延时所带来的影响这一问题,本文基于IDM模型提出一种改进跟车控制模型.改进模型具有以下两个特点:

1) 加权约束.道路中的车辆种类繁多,存在很大的机械性能差异,车辆的机械性能直接决定了它能够容忍的通信延时限度.简单而言,在车辆间距相同的情况下,当前方车辆速度突然发生变化时,机械性能较好的后方车辆只需很短的时间便能适应这一变化,它对通信延时的容忍度较高;性能较差的车辆则需耗费相对较长的时间来适应这一变化,它对通信延时的容忍度较低.所以需要车间距进行加权约束,均衡platoon中车辆对通信延时的容忍度,进而提升存在通信延时场景下platoon的性能.

2) 信息预估.当通信延时存在时,后方车辆所接收到的信息不等同于前方车辆的实际信息,使用该接收信息计算得到的后车加速度或速度是不符合platoon实际运行情况的.人们期望即使在通信延时很大的情况下,后方车辆跟车控制模块的输入信息依然能够近似于前方车辆的实时运行信息.因此,在模型中,根据运动学基本方程对车辆运动的实时状态进行预估,期望达到等效于理想通信的效果,弥补通信延时所带来的影响.

行驶在同一车道上的 n 辆车组成一个platoon.从右至左的顺序对车辆进行编号,头车编号为1,尾车编号为 n .头车作为整个platoon的参照物,它的速度是platoon中所有跟随车辆的目标速度.当platoon中车辆速度均达到一致时,称platoon处于稳定状态,此时platoon中车辆的速度为 v_e ,车辆间距为 s_e .定义车辆中心位置代表车辆所在位置,用 $p_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示.车辆的速度可以表示为 $v_i = dp_i(t)/dt$.Platoon内部车辆实际间距为

$$d_i(t) = p_{i-1}(t) - p_i(t), \quad i \geq 2. \quad (3)$$

在IDM模型中,通过联立式(1)和(2),计算得到的车辆之间应达到的实际间距为

$$s_i(t) = \frac{s_0 + v_i(t)T_0 + \frac{v_i(t)\Delta v_i(t)}{2\sqrt{ab}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_i(t)}{v_0}\right)^4 - \frac{a_i(t)}{a}}}. \quad (4)$$

定义向量 $v(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)]'$ 表示platoon中所有车辆的速度集合,向量 $d(t) = [d_2(t), d_3(t), \dots, v_n(t)]'$ 则表示所有车辆间距的集合.车辆速度与目标速度的差值被称为速度误差 ε ,实际行驶时的车辆间距与稳定状态下的车辆间距的差值被称为间距误差 e .两者分别表示为

$$\varepsilon(t) = [\varepsilon_1(t), \dots, \varepsilon_n(t)] = v(t) - v_e(t)A, \quad (5)$$

$$e(t) = [e_2(t), \dots, e_n(t)] = d(t) - s_e(t)A, \quad (6)$$

其中 $A = [1, 1, \dots, 1]$.Platoon协同控制的最终目的是为了达到,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\varepsilon(t) \rightarrow 0, e(t) \rightarrow 0$.

定义在 t 时刻platoon的整体长度为 $L(t)$.设定 s_0, v_0, T_0 均为恒定常量,这意味着platoon整体长度 $L(t)$ 只随着车辆速度 $v_i(t)$ 变化.此时有约束条件

$$\sum_{j=2}^n d_j(t) = \sum_{i=2}^n \left[\frac{s_0 + v_i(t)T_0 + \frac{v_i(t)\Delta v_i(t)}{2\sqrt{ab}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_i(t)}{v_0}\right)^4 - \frac{a_i(t)}{a}}} \right]. \quad (7)$$

在这里引入车辆性能综合评价系数 φ , φ 的取值在 $[0, 10]$ 内,该指标可以反映车辆机械性能的好坏.该参数的取值越小,证明车辆的性能越优,加速较快,制动灵敏;反之,则说明车辆的性能越差,加速慢,刹车反应迟缓.车辆性能不同导致车辆对通信延时的容忍程度有很大的差异.为了解决这一问题,本文期望车辆间距与车辆属性参数的比值为定值 δ ,即

$$\frac{d_i(t)}{\varphi_i} \rightarrow \delta, \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (8)$$

为了方便计算,定义 $\varphi = [\varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_n]'$ 为权重系数, $\psi = \text{diag}\left[\frac{1}{\psi_2}, \frac{1}{\psi_3}, \dots, \frac{1}{\psi_n}\right]'$ 为缩放矩阵, φ' 表示向量或矩阵 φ 的置换.加权约束控制的目的是

$$\psi d(t) \rightarrow \delta A. \quad (9)$$

由于 $A'd(t) = L(t)$, $\varphi'\psi = A'$, 有

$$\delta = \frac{\sum_{i=2}^n \left[\frac{s_0 + v_i(t)T_0 + \frac{v_i(t)\Delta v_i(t)}{2\sqrt{ab}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_i(t)}{v_0}\right)^4 - \frac{a_i(t)}{a}}} \right]}{\varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n}. \quad (10)$$

于是,车辆之间的车间距可以表示为 $d_i(t) = \delta\varphi_i$,此时,控制模型实际间距为

$$d_i = \frac{\sum_{i=2}^n \left[\frac{s_0 + v_i(t)T_0 + \frac{v_i(t)\Delta v_i(t)}{2\sqrt{ab}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_i(t)}{v_0}\right)^4 - \frac{a_i(t)}{a}}} \right]}{\varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n} \varphi_i. \quad (11)$$

根据式(11)以及IDM控制原理,可以推导出车辆之间的期望间距为

$$d_i^* = \frac{\sum_{i=2}^n \left[s_0 + v_i(t)T_0 + \frac{v_i(t)\Delta v_i(t)}{2\sqrt{ab}} \right]}{\varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n} \varphi_i. \quad (12)$$

假设 platoon 中的通信延时为 τ , 则在 t 时刻对于车辆 i 而言, 它接收到的控制信息是车辆 $i-1$ 在 $t-\tau$ 时刻的信息, 即 $a_{i-1}(t-\tau)$ 、 $v_{i-1}(t-\tau)$ 、 $p_{i-1}(t-\tau)$. 如果这些信息作为控制信息传递给后方车辆, 则将导致车辆驾驶行为的异常. 因此, 车辆 $i-1$ 发送来的信息不能直接被车辆 i 的协同控制系统所使用, 需要依据运动学基本公式对这些信息进行相应的处理. 定义 $\hat{a}_{i-1}(t)$ 、 $\hat{v}_{i-1}(t)$ 、 $\hat{p}_{i-1}(t)$ 表示处理后得到的车辆 $i-1$ 在 t 时刻的加速度、速度和位置信息, 处理原则为

$$\hat{a}_{i-1}(t) = a_{i-1}(t-\tau), \quad (13)$$

$$\hat{v}_{i-1}(t) = v_{i-1}(t-\tau) + a_{i-1}(t-\tau)\tau, \quad (14)$$

$$\hat{p}_{i-1}(t) = p_{i-1}(t-\tau) + v_{i-1}(t-\tau)\tau + \frac{1}{2}a_{i-1}(t-\tau)\tau^2. \quad (15)$$

将处理后的信息作为控制模型的输入, 最终得到期望间距 d_i^* 和加速度 \hat{a}_i 的计算规则为

$$d_i^* = \frac{\sum_{i=2}^n \left[s_0 + v_i T_0 + \frac{v_i[v_i - \hat{v}_{i-1}]}{2\sqrt{ab}} \right]}{\varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n} \varphi_i, \quad (16)$$

$$\hat{a}_i = a \left[1 - \left(\frac{v_i}{v_0} \right)^4 - \left(\frac{d_i^*}{\hat{p}_{i-1} - p_i} \right)^2 \right]. \quad (17)$$

式(17)中同时包含了加速策略和减速策略. 加速策略为 $\hat{a}_{\text{acc}}(v) = a \left[1 - \left(\frac{v_i}{v_0} \right)^4 \right]$, 它的应用很好地限制了车辆的速度始终不会超过最大允许车速 v_0 . 减速策略为 $\hat{a}_{\text{break}}(s, v, \Delta v) = -a \left[\frac{d_i^*}{(\hat{p}_{i-1} - p_i)} \right]^2$, 它的作用是防止车辆之间的间距过近. 如果道路上的车辆相隔很远, 则可忽略 $\hat{a}_{\text{break}}(s, v, \Delta v)$ 的影响, 此时, 协同控制模型的加速度计算公式可以简化为 $\hat{a}_{\text{acc}}(v)$, 它是一个关于速度的递减函数, 最大值为 $\hat{a}_{\text{acc}}(0) = a$, 最小值为 $\hat{a}_{\text{acc}}(v_0) = 0$. 当道路中车辆密度较大时, 减速策略变得非常重要, 它的大小取决于期望间距与实际间距的比值, 期望间距计算公式为式(16). 只有在非平稳交通状况下, 即 $\Delta v \neq 0$, 最后一项 $\frac{v_i[v_i - \hat{v}_{i-1}]}{2\sqrt{ab}}$ 才会被激活, 它的目的是限制减速度为舒适的减速度 b .

3 实验仿真

3.1 实验平台

采用文献[12]所描述的方法, 通过 VEINS 框架建立 SUMO 与 OMNeT++ 实时交互的 platoon 仿真平

台. SUMO 负责生成道路车辆运行场景, OMNeT++ 实现车辆控制信息的交换. 仿真实验参数为: $v_0 = 30 \text{ m/s}$, $T_0 = 1 \text{ s}$, $s_0 = 3 \text{ m}$, $a = 1 \text{ m/s}^2$, $b = 1 \text{ m/s}^2$.

3.2 稳定性分析

Platoon 的稳定是整个车辆队列安全行驶的重要保障, 人们期望所有单独车辆的非零位置、速度、加速度误差不会在 platoon 中被放大^[13]. 本文设计如下实验对 platoon 的稳定性进行检验: 一个包含 20 辆车的 platoon 以 25 m/s 的初速度在道路中行驶, 跟随车辆的性能综合评价系数 φ 分别为 0.4、0.7、1.0、1.4、1.5, 通信延时为 1000 ms , 1000 s 时刻头车的加速度为 -2 m/s^2 , 持续 5 s 后, 头车加速度恢复至 0.

图2给出了上述实验场景中使用 IDM 跟车模型所得到的 platoon 中车辆加速度的变化情况. 可以看到, 当头车的加速度发生变化时, 其后方跟随车辆的加速度随之发生改变, 并且越靠近后方的车辆, 加速度变化幅度越大, 同时伴有震荡现象. 这意味着头车速度的变化在 platoon 中被逐级放大, 此时 platoon 处于一种极度不稳定状态.

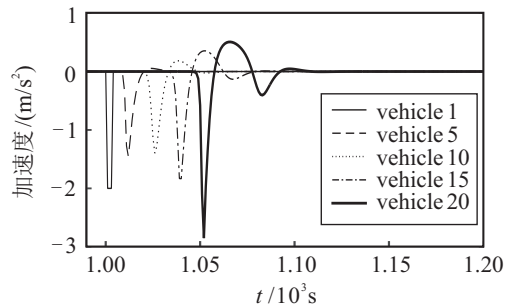


图2 IDM模型下车辆加速度变化情况

图3则表示在相同场景中使用改进跟车控制模型所得到的 platoon 中车辆加速度的变化情况. 可以清楚地看到, 当头车的加速度发生变化时, 同样引起了后方跟随车辆的速度变化. 但不同的是, 在改进跟车模型下, 车辆加速度的变化幅度相对较小, 并且表现出越靠近后方的车辆, 加速度变化越微弱的趋势, 没有明显的反复震荡的现象出现. 这说明 platoon 头车加速度的变化在 platoon 内部得到了消化, platoon 处于一种相对稳定的状态.

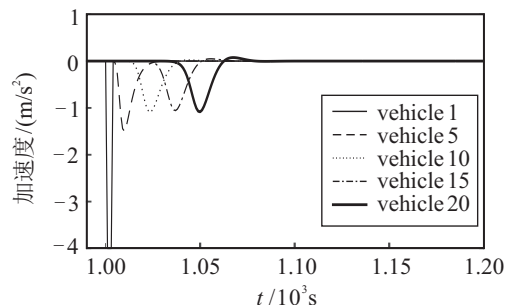


图3 改进模型下车辆加速度变化情况

通过对比实验可以得出结论:在存在通信延时的场景下,改进跟车模型相对于IDM跟车模型能够有效提升platoon的稳定性.

3.3 安全性分析

Platoon在行驶过程中是否安全是决定其实际应用的关键,尤其在车辆刹车制动的场景下.因此,可以使用platoon安全性这一指标来衡量跟车模型的性能.本文设计如下仿真实验:Platoon中拥有6辆车,

起始阶段车辆以25 m/s的速度稳定行驶,此后头车以2 m/s²的加速度开始减速行驶,直到车辆完全停止.跟随车辆的性能综合评价系数分别为0.4、0.7、1.0、1.4、1.5,通信延时分别为0 ms、100 ms、300 ms、500 ms.

图4中左侧为使用IDM模型得到的车辆间距变化图,右侧为使用本文所设计的改进跟车控制模型得到的车辆间距变化图.

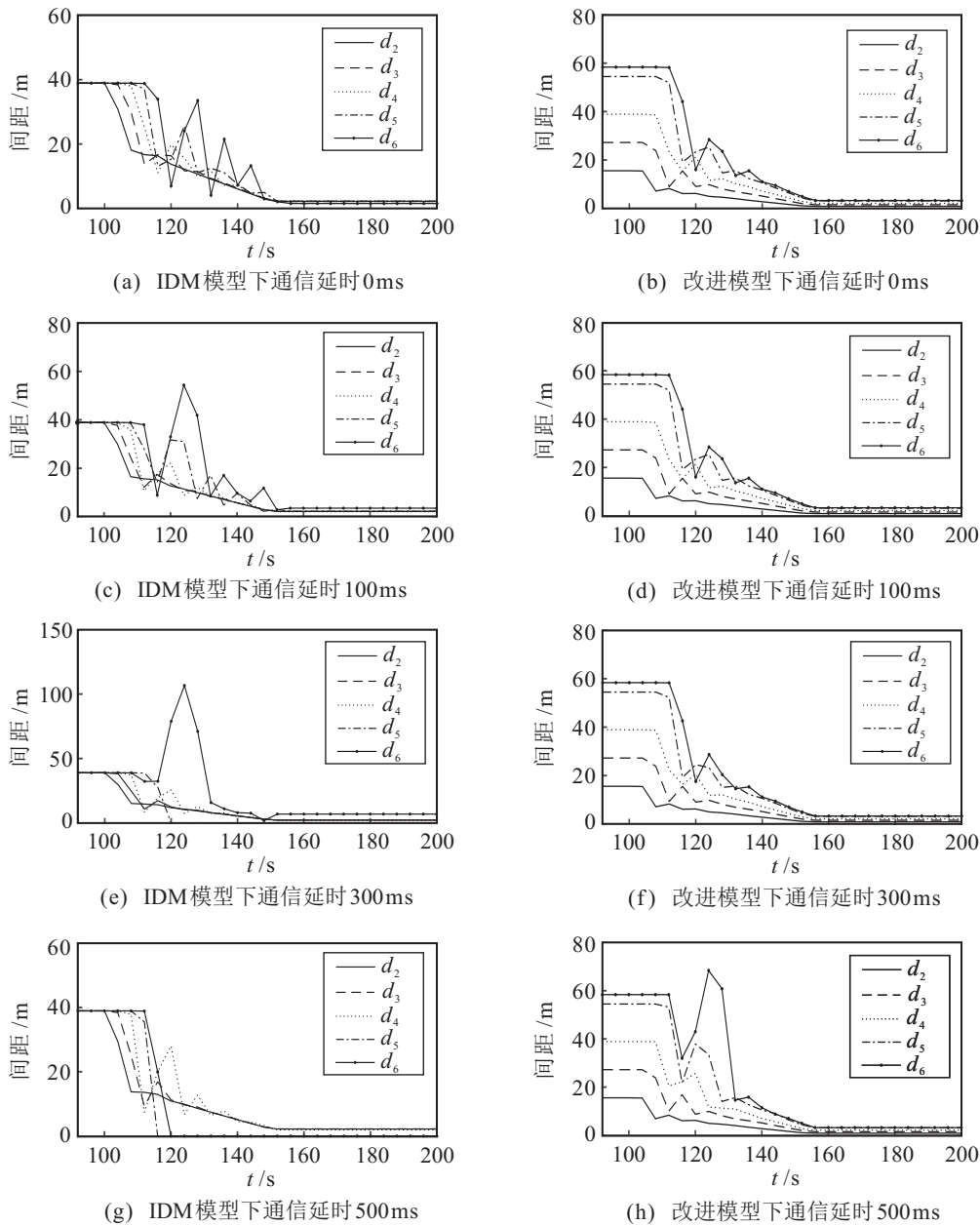


图4 通信延时下IDM模型与改进模型的性能对比

通过观察实验结果可以发现:在使用IDM控制模型的场景下,随着通信延时不断增加,车辆间距变化愈加剧烈;当通信延时达到300 ms以上时,platoon中出现车辆间距为0m的情况,这意味着发生了车辆碰撞的情况;并且通信延时越高,发生碰撞的车辆数

目越多.产生这现象的主要原因是,通信延时的存在,造成车辆之间传递的控制信息具有一定的时滞性,导致控制的输入信息与车辆驾驶的实际状态存在误差,因而控制器得到的控制输出不符合当前的车辆行驶情况.此时,platoon的安全性是无法得到有效保障

的.然而,在使用本文所提出的跟车控制模型的场景下,上述情况得到了良好的改善.通信延时的逐渐增加,并没有对platoon车辆行驶造成显著的负面影响,车辆间距变化过程相对平缓,波动幅度相对较小,这说明加权约束和信息预估策略起到了积极作用,最大程度降低了通信延时对platoon的影响作用.但通信延时达到500ms时,车辆间距的震荡幅度有所增加,这是因为信息预估所得到的车辆运行状态与车辆运行的实时状态之间存在可接受范围内的细微误差,但并不会威胁到platoon的安全.

通过上述的对比分析可以得出结论:本文所提出的改进模型能够有效地弥补通信延时的存在对platoon安全性的影响,platoon的安全性得到了极大的提升.

4 结论

Platoon作为一项面向未来的应用,它的出现有望彻底解决当前日益严峻的交通问题.本文针对platoon中车辆之间控制信息传递存在延时的的问题,在IDM跟车模型的基础上提出了一种改进跟车控制模型.改进模型具备以下两个特点:1)根据车辆的属性对车间距进行加权约束,解决platoon中各个车辆对通信延时容忍度不一致的问题,从而提升platoon的整体性能;2)以运动学基本公式为依据,在已知过去时刻车辆运动的情况下对车辆驾驶实时状态进行预测,将预测信息作为车辆控制模块的输入,从而弥补通信延时所带来的影响.仿真实验结果表明,相比于经典的IDM跟车模型,本文所提出的改进模型能够在存在通信延时的场景下有效提升platoon的稳定性和安全性.

Platoon中车辆之间的通信面临着许多障碍,通信延时只是其中一种,数据包丢失、误码、带宽有限、网络负载高等问题的存在都对platoon发起了挑战.因此,下一步将从这几个方面入手,寻求更为全面的解决方案.

参考文献(References)

[1] Aridor M, Hannan L A. Traffic jam: A compendium of human diseases that affect intracellular transport processes[J]. *Traffic*, 2000, 1(11): 836-851.

[2] Toor Y, Muhlethaler P, Laouiti A. Vehicle ad hoc networks: Applications and related technical issues[J].

IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2008, 10(3): 74-88.

[3] Liang K Y, Mårtensson J, Johansson K H. Heavy-duty vehicle platoon formation for fuel efficiency[J]. *IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(4): 1051-1061.

[4] Peng H, Li D, Abboud K, et al. Performance analysis of IEEE 802.11p DCF for inter-platoon communications with autonomous vehicles[C]. *Global Communications Conf(GLOBECOM)*. San Diego: IEEE, 2015: 1-6.

[5] Peng H, Li D, Abboud K, et al. Performance analysis of IEEE 802.11p DCF for multi-platooning communications with autonomous vehicles[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2017, 66(3): 2485-2498.

[6] Shao C, Leng S, Zhang Y, et al. Performance analysis of connectivity probability and connectivity-aware MAC protocol design for platoon-based VANETs[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2015, 64(12): 5596-5609.

[7] Jia D, Lu K, Wang J. A disturbance-adaptive design for vanet-enabled vehicle platoon[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2014, 63(2): 527-539.

[8] Guo X, Wang J, Liao F, et al. Distributed adaptive integrated-sliding-mode controller synthesis for string stability of vehicle platoons[J]. *IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(9): 2419-2429.

[9] Fernandes P, Nunes U. Multiplatooning leaders positioning and cooperative behavior algorithms of communicant automated vehicles for high traffic capacity[J]. *IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(3): 1172-1187.

[10] Lei C, Van Eenennaam E M, Wolterink W K, et al. Impact of packet loss on CACC string stability performance[C]. *The 11th Int Conf on ITS Telecommunications (ITST)*. St. Petersburg: IEEE, 2011: 381-386.

[11] 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 Trans on Control Systems Technology*, 2000, 8(4): 695-708.

[12] Sommer C, German R, Dressler F. Bidirectionally coupled network and road traffic simulation for improved IVC analysis[J]. *IEEE Trans on Mobile Computing*, 2010, 10(1): 3-15.

[13] Ploeg J, Shukla D P, van de Wouw N, et al. Controller synthesis for string stability of vehicle platoons[J]. *IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(2): 854-865.

(责任编辑:李君玲)