

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.09.005

商用半挂车队列纵向运动协同控制及仿真

陈明哲, 冀 杰, 唐志荣, 吴明阳

(西南大学 工程技术学院, 重庆 400715)

摘要:基于滑模控制理论设计了一种适用于商用半挂车队列行驶的协同自适应巡航控制算法,并分别采用相邻两车车间通信和领车与跟随车辆直接通信两种通信方式对商用半挂车队进行纵向运动控制,在 MATLAB/simulink 和 Trucksim 软件环境下进行联合仿真及性能对比。仿真结果表明,与相邻两车车间通信方式相比较,采用领车与跟随车辆直接通信的方式可以有效缩短每辆跟踪车辆的响应时间和相应的行车间距,增强车队稳定性和安全性,提高道路通行能力。

关键词:商用半挂车;滑模控制;车间通信;联合仿真;车队稳定性

中图分类号:U46

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)09-039-09

Cooperative longitudinal control and simulation of commercial semi-trailers' platoon

CHEN Mingzhe, JI Jie, TANG Zhirong, WU Mingyang

(College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, P.R.China)

Abstract: A cooperative adaptive cruise control algorithm is designed for commercial semi-trailers' platoon based on sliding mode control theory. Two inter-vehicle communication modes, the communication between adjacent vehicles and that between leading vehicle and following vehicles, are adopted for longitudinal motion control of commercial semi-trailers' platoon. Then, the performance of the designed controller is illustrated and compared with computer simulations using MATLAB and TruckSim software. Simulation results show that, compared with the communication between adjacent vehicles, the communication between leading vehicle and following vehicles can reduce the response time and the inter-vehicle space effectively. Besides, it can increase the stability and safety of semi-trailers' platoon, improving the traffic capacity.

Keywords: commercial semi-trailers, sliding mode control, inter-vehicle communications, co-simulation, platoon stability

收稿日期:2018-03-12

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(61304189),重庆市前沿与应用基础研究计划一般资助项目(cstc2015jcyjA60007)和中央高校基本业务费专项资金重点资助项目(XDJK2015B028)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61304189), Basic and Advanced Research Projects in Chongqing (cstc2015jcyjA60007) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities.

作者简介:陈明哲(1994—),男,西南大学硕士研究生,主要从事车辆队列巡航控制研究,(E-mail)korchen@163.com。

冀杰(联系人),男,西南大学副教授,博士,(Tel)13594188175,(E-mail)jjjiess@163.com。

目前,国内商用半挂车在整体商用专用车中的比重达到 30%,并且增长势头强劲^[1]。如果将道路上的商用半挂车作为整体进行编队组合和控制,并将车队中行驶路线相同的所有车辆的运行状态(即速度、加速度、车间距等)尽可能归于一致,将有效简化交通控制对象和增强车辆的行驶安全性。在传统自适应巡航控制基础上衍生出的协同自适应巡航控制(CACC, cooperative adaptive cruise control),除了具备 ACC 系统的车辆跟踪和定速巡航功能之外^[2],还可以接受周围车辆的行驶状态信息和道路交通传感器信息,能够更好地缩短行驶车间距,提高道路通行能力,是实现车队协同控制的重要措施^[3]。

对车辆纵向运动协同控制的研究主要包括:Xiao 等^[4]讨论了基于滑模控制的 ACC 队列跟驰稳定性并进行了仿真分析,仿真结果表明,ACC 队列跟驰不稳定是由于传感器获取信息的延迟和执行器执行控制的滞后造成的。Wang 等^[5]在 CACC 跟驰算法基础上,产生描述车辆运动的期望动力学物理量,通过车辆状态反馈进行跟踪控制上位控制器采用滑模控制。Mohajerpoor 等^[6]利用车辆之间的通讯系统,进一步研究了 PID 控制的滑动模型,采用模糊逻辑控制器和模糊专家系统,决定在何种情况下应该采用何种控制方式。申忠宇等^[7]根据智能车辆协作控制要求,设计了智能车辆分布式自主决策程序,实现多辆智能车自由运行、队列跟随和路口协作等运行模式,采用线性最优二次型的车队跟随控制算法,实现多车辆编队的启停、匀速和加减速控制。在合作驾驶挑战赛(GCDC, grand cooperative driving challenge)^[8-9]中获胜的团队“AnnieWay”所开发的 CACC 系统采用了最优控制,通过对代价函数做离散化,利用欧拉-拉格朗日问题的求解方法求取最优控制率作为控制期望^[10]。Naus 等^[11]研究了 CACC 系统保证队列稳定性的机理,并给出一种易于实施的 CACC 跟驰算法,证明了恒定跟驰距离的 ACC 系统难以保证队列稳定性,而变时距的 ACC 系统可以通过加大跟驰距离和控制增益来实现队列稳定性,CACC 系统可以在保证队列稳定性的基础上大幅缩减跟驰间距。

目前,在大部分 CACC 系统的相关研究中,车间通信的主要形式是队列中的车辆与相邻前车进行通信,另外,目前专门针对商用半挂车队列的协同运动控制研究较少。因此,文中基于滑模控制设计了一种适用于商用半挂车车队行驶的协同运动控制算法,通过感知本车和前车的信息(包括位置、速度和加速度)以及领队车辆的信息(包括领队车的速度和加速度),并采用相邻两车车间通信以及领车与跟随车辆直接通信两种通信方式,对比分析车辆队列协同控制中的车队纵向控制性能,最后利用 MATLAB/simulink 和 Trucksim 软件进行了联合仿真和验证。

1 车辆队列数学模型

车辆队列行驶是指沿道路同一方向 2 辆及以上的汽车,保持固定的车间距离和相同的速度以队列行进的方式行驶。车辆通过加装多种传感器,并采用车间通信方式,使车辆能够获取多车的行驶信息。这样后车可以按照前车行驶的路线及操作方式行驶,并将整个车辆队列作为一个整体来控制,其模型如图 1 所示。

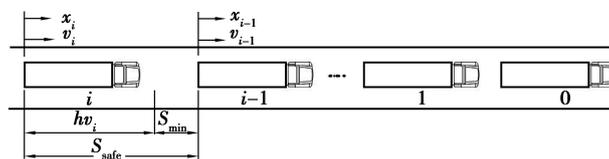


图 1 车辆队列模型

Fig.1 Schematic model of vehicle platoon

1.1 车队模型的建立

假设车队在水平道路上行驶,设定车辆队列中第 i 辆车的位置、速度和加速度分别为 x_i, v_i 和 a_i ($i = 1, \dots, n-1$), $i=0$ 代表领队车辆,加速度通过求速度的一阶导数得出。第 i 辆跟随车的动态数学模型可以由以下非线性微分方程表示

$$\dot{\delta}_i = v_{i-1} - v_i, \quad (1)$$

式中: δ_i 是期望车间距离与实际距离误差;

$$\dot{v}_i = a_i, \quad (2)$$

$$a_i = \frac{F_t - F_b - F_z}{m_i}, \quad (3)$$

其中: F_t 是驱动力; F_b 是制动力; F_z 是行驶阻力; m_i 是车辆的质量。

1.2 传动系统建模

建立的发动机模型能够根据发动机的油门开度和发动机转速信息,通过查询 MAP 值确定发动机输出转矩,为

$$T_{\text{eng}} = f(\omega, k_v), \quad (4)$$

式中: T_{eng} 为发动机输出转矩; ω 为发动机转速; k_v 为油门开度。

在传动系统建模过程中,按照动力传递顺序,将传动系统细化成为 4 个模块:发动机及离合器主动部分、离合器从动部分及变速器主动部分、变速器从动部分及主减速器主动部分、主减速器从动部分及差速器^[12]。

$$T_{\text{cg}} = T_{\text{eng}} - \frac{I_{\text{cg}} \cdot \omega \cdot i_g}{r o_a}, \quad (5)$$

式中: T_{cg} 为离合器输出转矩; I_{cg} 为离合器和变速箱转动惯量; i_g 为档位; $r o_a$ 为传动比。

$$T_{\text{gm}} = T_{\text{cg}} - \frac{I_{\text{gm}} \cdot \omega}{r o_m}, \quad (6)$$

式中: T_{gm} 为变速箱输出转矩; I_{gm} 为变速箱与主减速器之间部件和主减速器转动惯量; $r o_m$ 为主减速比。

$$T_{\text{mh}} = T_{\text{gm}} - \frac{I_{\text{mh}} \cdot \omega}{2} \quad (7)$$

式中: T_{mh} 为半轴输出转矩; I_{mh} 为半轴转动惯量。

F_t 、 F_b 和 F_z 结构为

$$F_t = \frac{T_{\text{mh}}}{r}, \quad (8)$$

$$F_b = P_b \cdot \eta \cdot S \cdot K_f \cdot 2, \quad (9)$$

$$F_z = Gf + \frac{C_D A_i}{21.15} v_i^2 + G\lambda + \delta m_i a_i, \quad (10)$$

式中: r 为车轮半径; P_b 为制动气室压强; η 为制动效率; S 为转动气室面积; K_f 为制动衬块与转动盘间摩擦系数。 G 、 f 、 C_D 、 A_i 、 λ 和 δ 分别代表作用在车辆上的重力、滚动阻力系数、空气阻力系数、迎风面积、道路坡度以及车辆旋转质量换算系数。

1.3 间距策略设计

目前,自适应巡航控制系统中可变间距策略应用较为广泛,可变间距策略依据车间时距设计,大致可分为固定车间时距 CTH(constant time headway)和可变车间时距 VTH(variable time headway)^[13]。鉴于 CTH 算法简单、计算量小,且考虑了汽车速度对于安全距离的影响,符合实际驾驶员习惯。因此,文中采用了固定车间时距的间距策略。

在固定车间时距的间距策略下,在 t 时刻,第 i 辆跟随车的安全车距定义为

$$S_{\text{safe}}(t) = h v_i(t) + S_{\text{min}}, \quad (11)$$

式中: h 表示固定车头时距; S_{min} 表示最小安全间距。

如图 1 所示,考虑存在于车间通信中的延时对系统的影响。假设每两辆通信车之间具有相同的通信延时 τ ,则第 i 和 $i-1$ 辆车的实际车间距 S_i 为

$$S_i t = x_{i-1}(t - \tau) - x_i(t - \tau) - l, \quad (12)$$

式中: l 定义为车辆长度; $x_i(t - \tau)$ 和 $x_{i-1}(t - \tau)$ 分别代表编号 i 和 $i-1$ 车辆的延时位置。

第 i 辆车的期望车间距偏差定义为

$$\delta_i(t) = S_i(t) - S_{\text{safe}}(t) = S_i(t - \tau) - h v_i(t - \tau) - S_{\text{min}}. \quad (13)$$

2 基于滑模控制的车辆队列协同控制

滑模控制结构具有很强的鲁棒性,比较适用于如图 1 所示的车辆队列模型的运动控制系统^[14]。假设车

辆队列同向行驶,通过车间通信来完成控制系统的信息获取,主要涉及的状态参数有车速、加速度、车间距,并设定无线通信正常,通信存在延迟,不存在丢包现象。

2.1 控制系统设计

针对车辆队列协同控制结构,建立滑模控制模型的主要步骤如下:

2.1.1 选取滑模切换函数

定义非线性系统函数为

$$\dot{\mathbf{z}} = f(\mathbf{z}, \mathbf{u}, t), \quad (14)$$

式中,分别定义 $\mathbf{z} \in \mathbf{R}^n$, $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$ 为控制系统的状态向量。根据状态空间表达式定义滑模切换函数^[15]为

$$\mathbf{Y}(\mathbf{z}, t) = \mathbf{Y}(z_1, z_2, z_3, \dots, t) = 0. \quad (15)$$

控制量 $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{z}, t)$ 按照下列逻辑在切换面 $\mathbf{Y}(\mathbf{z}, t)$ 上进行切换,即

$$\mathbf{u}_i(\mathbf{z}, t) = \begin{cases} \mathbf{u}_i^+(\mathbf{z}, t), \mathbf{Y}_i(\mathbf{z}, t) > 0, i = 1, \dots, m, \\ \mathbf{u}_i^-(\mathbf{z}, t), \mathbf{Y}_i(\mathbf{z}, t) < 0, i = 1, \dots, m, \end{cases} \quad (16)$$

式中: i, m 为正整数; $\mathbf{u}_i(\mathbf{z}, t)$ 、 $\mathbf{Y}_i(\mathbf{z}, t)$ 分别是 $\mathbf{u}(\mathbf{z}, t)$ 和 $\mathbf{Y}(\mathbf{z}, t)$ 的第 i 个分量; $\mathbf{u}_i^+(\mathbf{z}, t)$ 、 $\mathbf{u}_i^-(\mathbf{z}, t)$ 、 $\mathbf{Y}_i(\mathbf{z}, t)$ 均为连续函数,通常其维数与控制向量相等。

为保证车辆队列始终大于安全车距行驶,定义期望加速度值的滑模切换函数为

$$\mathbf{Y} = \delta_i(t) + \dot{S}_i(t). \quad (17)$$

当 $\mathbf{Y} \rightarrow 0$ 时,因为 $\delta_i(t) \geq 0$,也就有 $\delta_i(t) \rightarrow 0$ 和 $\dot{S}_i(t) \rightarrow 0$,即第 i 辆车的车间距偏差 $\delta_i(t)$ 和相对速度 $\dot{S}_i(t)$ 趋于零。

车间距偏差计算式(13)代入式(17),可得

$$\mathbf{Y} = \delta_i(t - \tau) + \dot{S}_i(t - \tau) = \dot{S}_i(t - \tau) + S_i(t - \tau) - h v_i(t - \tau) - S_{\min}, \quad (18)$$

此时,滑模切换函数 \mathbf{Y} 逐渐趋向于 0。

2.1.2 选择趋近律

趋近律用来保证滑模切换运动的品质,能够反映滑模切换函数是否可以快速高效地满足切换面的到达条件,对于实时性要求高的控制系统,适宜采用等速趋近律来实现^[16]。即

$$\dot{\mathbf{Y}} = -k \cdot \text{sgn} \mathbf{Y}, k > 0. \quad (19)$$

得到滑模控制方程为

$$\dot{\mathbf{Y}} = -\lambda \mathbf{Y}. \quad (20)$$

当式(20)满足时, $\mathbf{Y} \rightarrow 0$,也就有滑模面 $\delta_i(t) + \dot{S}_i(t) \rightarrow 0$,其中, $\lambda > 0$ 表示控制器参数。

将式(18)代入 $\dot{\mathbf{Y}} = -\lambda \mathbf{Y}$,计算结果为

$$\dot{\delta}_i(t - \tau) + \ddot{S}_i(t - \tau) + \lambda(\delta_i(t - \tau) + \dot{S}_i(t - \tau)) = 0. \quad (21)$$

将车间距偏差定义式(13)及相对速度 $\dot{S}_i(t) = v_{i-1} - v_i$ 代入式(21),可以化简为

$$\dot{S}_i(t - \tau) - h \dot{v}_i(t - \tau) - \dot{v}_i(t - \tau) + \dot{v}_{i-1}(t - \tau) + \lambda(\delta_i(t - \tau) + \dot{S}_i(t - \tau)) = 0. \quad (22)$$

保证安全车间距行驶下,理想的加速度计算模型定义为

$$a_{i,\text{des}}(t) = \frac{1}{h+1} \times \{\dot{S}_i(t - \tau)(1 + \lambda) + \dot{v}_{i-1}(t - \tau) + \lambda \delta_i(t - \tau)\}. \quad (23)$$

2.2 车辆队列稳定性分析

保证车队队列稳定,即保证瞬时误差不会沿队列向后逐渐扩大,是车队控制中的重要内容,因为瞬时误差的传递可能会导致车队队列解体,甚至发生碰撞^[17]。若车辆队列行驶中满足稳定性条件,则需要车队控制系统中第 i 辆车和第 $i+1$ 辆车的车间距误差的传递函数 G_∞ 。满足范数小于或者等于 1^[18],即 $\|G_i(s)\|_\infty \leq 1$ 。

根据式(13)期望车间距偏差,联合前后两车的期望加速度方程,即

$$\begin{cases} a_{i,\text{des}}(t) = \frac{1}{h+1} \{ \dot{S}_i(t-\tau)(1+\lambda) + \dot{v}_{i-1}(t-\tau) + \lambda \delta_i(t-\tau) \}, \\ a_{i-1,\text{des}}(t) = \frac{1}{h+1} \{ \dot{S}_{i-1}(t-\tau)(1+\lambda) + \dot{v}_{i-2}(t-\tau) + \lambda \delta_{i-1}(t-\tau) \}. \end{cases} \quad (24)$$

以上 2 式相减,并结合式(13),可得

$$\begin{aligned} (1+h)\ddot{\delta}_i(t-\tau) + (1+(1+h)\lambda)\dot{\delta}_i(t-\tau) + \lambda\delta_i(t-\tau) = \\ \ddot{\delta}_{i-1}(t-\tau) + (1+\lambda)\dot{\delta}_{i-1}(t-\tau) + \lambda\delta_{i-1}(t-\tau). \end{aligned} \quad (25)$$

对式(25)进行拉普拉斯变换可得

$$G_i(s) = \frac{\delta_{i-1}(s)}{\delta_i(s)} = \frac{s^2 + (1+\lambda)s + \lambda}{(h+1)s^2 + (1+(1+h)\lambda)s + \lambda}. \quad (26)$$

基于该传递函数,可以通过计算 $\|G_i(s)\|_\infty$ 的值判别车队的稳定性。车辆队列稳定性是车队中车间距偏差和速度误差不会沿队列向后逐渐扩大,也就是说,当 $|G(j\omega)| < 1$ 时,车队队列稳定。即

$$G_i(s) = \left| \frac{-\omega^2 + j(1+\lambda)\omega + \lambda}{-(h+1)\omega^2 + j(1+(1+h)\lambda)\omega + \lambda} \right| \leq 1. \quad (27)$$

简化后可得

$$h^2\omega^4 - 2h\lambda\omega^4 + 2h\omega^4 + \omega^2(h^2\omega^2 + 2h\lambda + 2h\lambda^2) > 0, \quad (28)$$

即需要满足

$$(h^2 + 2h)(\omega^2 + \lambda^2) > 0, \quad (29)$$

式中, h 为固定车头时距,故 $h > 0$ 。所以当控制器参数满足 $\lambda > 0$ 时,队列稳定性判断准则 $|G(j\omega)| < 1$ 对任何 $\omega > 0$ 都成立,即车辆队列稳定性可以保持。

3 车队模型 Simulink/Trucksim 联合仿真

在 Simulink 和 Trucksim 仿真环境下,建立由 5 辆商用半挂车组成的车队模型,并分别采用相邻 2 车车间通信和领车与跟随车辆直接通信 2 种通信模式,如图 2 和图 3 所示。

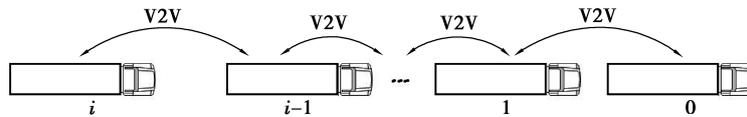


图 2 相邻两车车间通信的 i 辆半挂车队列示意图

Fig.2 Schematic illustration of semi-trailers' platoon for communication between adjacent vehicles

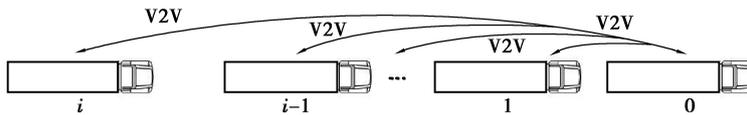


图 3 领车与跟随车辆直接通信的 i 辆半挂车队列示意图

Fig.3 Schematic illustration of semi-trailers' platoon for communication between leading vehicle and following vehicles

仿真环境的部分具体参数设置如表 1 所示,其余相关参数设置参考 Trucksim 软件中的商用半挂车模型。

表 1 控制参数配置表

Table 1 Parameters for control system

固定车间时距 h/s	安全车间距离 S_{\min}/m	滑模控制器参数 λ	通信延时 τ/s
2	15	0.1	0.3

Simulink/Trucksim 多车联合仿真界面如图 4 所示,该仿真系统包括通信模块、雷达模块、控制模块和显示模块等。

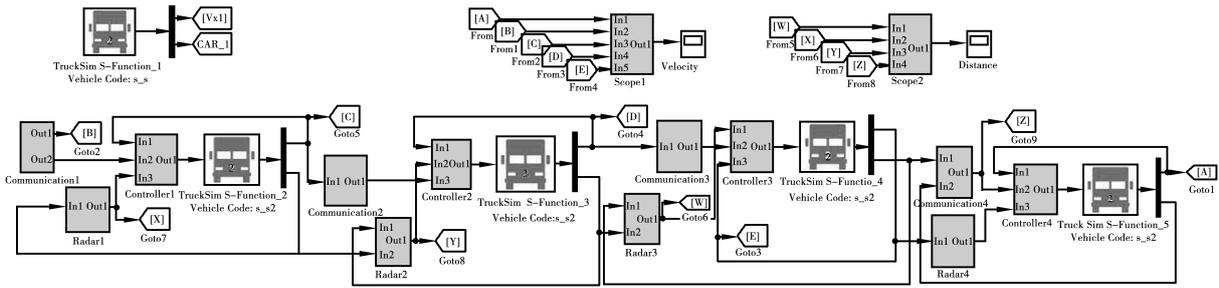


图 4 Simulink/Trucksim 联合仿真界面

Fig.4 Co-simulations interface using MATLAB and TruckSim

在仿真过程中,领车的初始速度设置为 60 km/h,其余 4 辆车的初始速度设置为 80 km/h,初始车间距均为 15 m。系统输入为车辆队列领车的运动工况,包括急加速、急减速和常规巡航等运动状态。领车的油门踏板开度以及作用在每个车轮上的制动压强如图 5 所示。

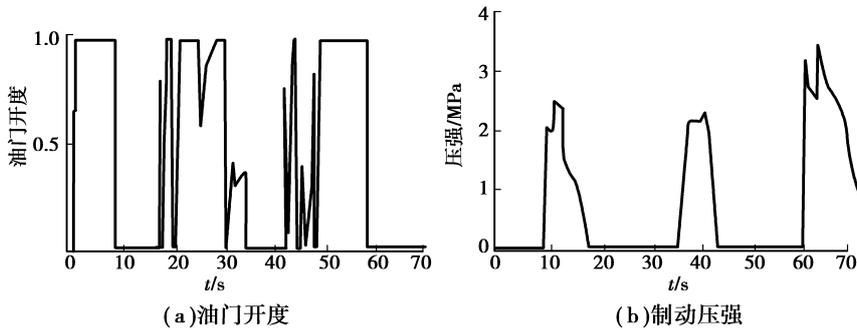


图 5 领车的油门开度及作用在每个车轮上的制动压强

Fig.5 Throttle and brake pressure of leading vehicle

运行 Trucksim 软件的 3D 实际场景模拟,得到 5 辆商用半挂车组成的队列在公路上运行的 3D 仿真效果,如图 6 所示。



图 6 5 辆车队列的仿真效果图

Fig.6 The simulation scene of semi-trailers' platoon

对比 2 种通信方式下的相邻两车间距和车辆速度,得出如图 7 和图 8 所示的协同运动控制仿真结果。通过仿真结果曲线可以看出,在采用相邻两车车间通信以及领车与跟随车辆直接通信 2 种通信方式的协同运动模型中,5 辆车前后顺序均不发生改变,均没有发生追尾事故。

由图 7 可见,在 0~3 s 仿真时间内,由于后方车辆与领车存在速度差,2 个车间距曲线图均小幅下降而后正常上升,对车队整体性影响不明显。在 3~30 s 仿真时间内,随着车队的行驶,2 种通信方式下的车间距都有增加的趋势,都逐渐趋近固定车间时距策略下的安全车距。但是相比第一种通信方式,第二种通信方式

下的车间距增加更加平缓,4 条曲线之间的差异也较为明显,对于车队中位置越靠后的车辆,相应的车间距的增加越缓慢。在 30~70 s 仿真时间内,在第一种通信方式下的车间距主要影响因素是速度的变化,曲线大致形态随速度的变化而波动,在第二种通信方式下的 4 条曲线除第一条呈波动趋势外,其余 3 条曲线仍然在缓慢增长。在车间距变化相对平稳的 30~70 s 间选择 35 s、50 s、60 s 3 个特征时刻分析,如表 2 所示,在第一种通信方式下 3 组车间距范围分别是 57~64 m、53~57 m、56~70 m,在第二种通信方式下 3 组车间距范围分别是 24~64 m、38~58 m、43~70 m,相对应的车间距得到大幅降低,尤其对于车队中处于后方的车辆影响明显。

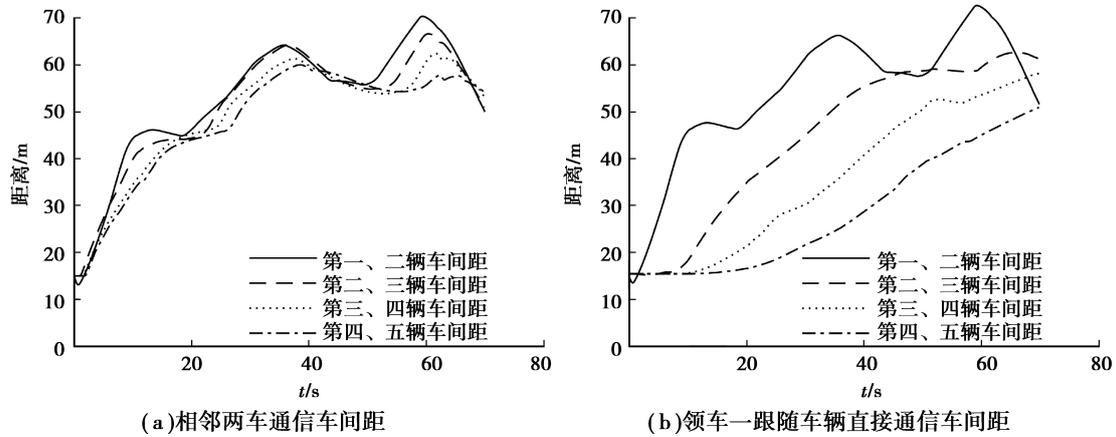


图 7 2 种通信方式下相邻两辆车的车间距仿真曲线

Fig.7 The curves of inter-vehicle space with two communication modes

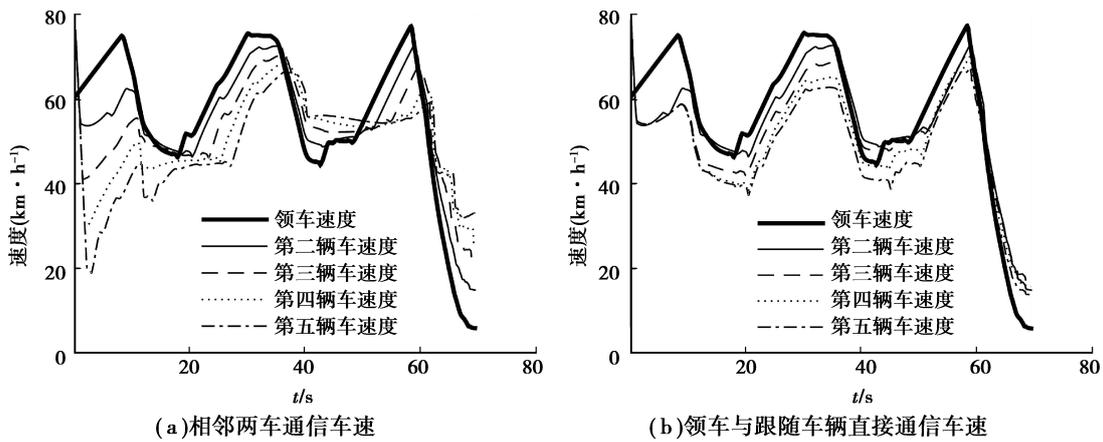


图 8 2 种通信方式下 5 辆车的速度仿真曲线

Fig.8 The curves of vehicle speed with two communication modes

表 2 特征时刻车间距表

通信方式	特征时刻车间距		
	第 35 s	第 50 s	第 60 s
相邻两车车间通信	57~64	53~57	56~70
领车与跟随车辆直接通信	24~64	38~58	43~70

由图 8 可见,在 0~3 s 仿真时间内,领车从 60 km/h 开始做一段匀加速运动,后方车辆从 80 km/h 先减

速维持安全车距,而后回归正常加速跟车,响应迅速保证车队整体性。从第 8 s 至仿真结束,领车进行了 3 次减速和 2 次加速过程,2 种通信方式下的速度曲线存在两个明显差异。一是第二种通信方式下的 5 条曲线更加紧凑,选择 10 s、30 s、60 s 3 个特征时刻分析,如表 3 所示,第一种通信方式下 3 组车速范围分别是 42~68 km/h、56~75 km/h、57~70 km/h,在第二种通信方式下 3 组车间距范围分别是 55~68 km/h、62~75 km/h、60~70 km/h,这表明当前车速度变化时,后车在速度上有更好的跟随性,可以提高车队稳定性。

表 3 特征时刻车速表

Table 3 The vehicle speed at corresponding moments (km · h⁻¹)

通信方式	特征时刻车速		
	第 10 s	第 30 s	第 60 s
相邻两车车间通信	42~68	56~75	57~70
领车与跟随车辆直接通信	55~68	62~75	60~70

二是第二种通信方式下车速变化的相应更迅速,以领车在 18 s 的加速为例,在第一种通信方式下后车加速时刻分别为 20 s、23 s、26 s 和 28 s,在第二种通信方式下跟随车辆均在 20 s 开始加速,这表明通信延迟和控制系统之后时间不会在车队后方形成叠加效果,可以很大程度地提高车队稳定性。

4 结 论

1)建立了可用于 CACC 系统控制的商用半挂车纵向运动模型,设计了一种滑模控制器并采用两种车间通信方式对车辆队列跟踪性能和稳定性能进行了分析。

2)相比于相邻两车车间通信,采用领车与跟随车辆直接通信的方式,车间距离降低 10%~20%,车辆相应更加迅速,在第三、四、五辆车上产生的通信延迟时间和系统滞后时间分别缩短约 1 s、2 s、3 s。通过实时接受领车行驶状态信息,实现了更好的车辆队列纵向控制效果,跟随车辆的响应时间和相应的行车间距得到明显下降,车队稳定性和安全性得到提高,道路的通行能力大幅度增强。

参考文献:

- [1] 董华周,徐国红.纵观汉诺威商用车展,探析国内挂车未来发展[J].专用汽车,2017(1):41-44.
DONG Huazhou, XU Guohong. A review of Hannover commercial auto show to explore the future development of domestic trailers[J]. Special Purpose Vehicle, 2017(1):41-44.
- [2] 吴光强,张亮修,刘兆勇,等.汽车自适应巡航控制系统研究现状与发展趋势[J].同济大学学报(自然科学版),2017,(4):544-553.
WU Guangqiang, ZHANG Liangxiu, LIU Zhaoyong, et al. Research Status and Development Trend of Vehicle Adaptive Cruise Control Systems[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2017, (4):544-553.
- [3] 王灿,马钧.汽车 CACC 系统的车头时距策略研究[J].农业装备与车辆工程,2015,(2):60-67.
WANG Can, MA Jun. Study on automotive CACC system headway policy[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2015, (2):60-67.
- [4] Xiao L, Gao F. Practical string stability of platoon of adaptive cruise control vehicle[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1184-1194.
- [5] Wang J, Surampudi B, Steiber J. Autonomous ground vehicle control system for high-speed and safe operation:, US8180513[P]. 2012.
- [6] Mohajerpoor R, Dezfuli S S, Bahadori B. Teleoperation of an unmanned car via robust adaptive backstepping control approach[C]// IEEE/asme International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Wollongong, NSW,

- Australia: IEEE, 2013:1540-1545.
- [7] 申忠宇,郑启文,王川,等.无线通信网络的多智能小车编队控制系统[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(s1):18-21.
- SHEN Zhongyu, ZHENG Qiwen, WANG Chuan, et al. Multi-smart car control system based on wireless communication network[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2013, 43(s1):18-21.
- [8] Ploeg J, Shladover S, Nijmeijer H, et al. Introduction to the Special Issue on the 2011 Grand Cooperative Driving Challenge[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(3):989-993.
- [9] Van Nunen E, Kwakkernaat M R J A E, Ploeg J, et al. Cooperative Competition for Future Mobility[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(3):1018-1025.
- [10] Geiger A, Lauer M, Moosmann F, et al. Team annie way's entry to the 2011 grand cooperative driving challenge[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(3):1008-1017.
- [11] Naus G J L, Vugts R P A, 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.
- [12] Miller J, Cebon D. A high performance pneumatic braking system for heavy vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2010 (48): 373-392.
- [13] 高振海,严伟,李红建,等.汽车自适应巡航线性参变间距控制算法[J].吉林大学学报(工学版),2016,(4):1023-1029.
- GAO Zhenhai, YAN Wei, LI Hongjian, et al. Design of linear parametrically varying headway control algorithm for ACC vehicles[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2016, (4):1023-1029.
- [14] 李升波,李国强,王建强,等.非奇异快速的终端滑模控制方法及其跟车控制应用[J].控制理论与应用,2010,27(5):543-550.
- LI Shengbo, LI Keqiang, WANG Jianqiang, et al. Nonsingular fast terminal-sliding-mode control method and its application on vehicular following system[J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(5):543-550.
- [15] 李庆良,雷虎民,杨志峰,等.一种基于即时学习的非线性系统滑模预测控制方法[J].控制与决策,2011,(4):524-529.
- LI Qingliang, LEI Humin, YANG Zhifeng, et al. Sliding mode predictive control for nonlinear systems based on lazy learning[J]. Control and Decision, 2011, (4):524-529.
- [16] 杨康,王振臣,赵莎.基于滑模变结构控制的车辆稳定性研究[J].现代制造工程,2014,(10):53-59.
- YANG Kang, WANG Zhenchen, ZHAO Sha. Study of vehicle stability base on sliding model control[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2014, (10):53-59.
- [17] Rödönyi G, Gáspár P, Bokor J, et al. Experimental Verification of Robustness in a Semi-autonomous Heavy Vehicle Platoon[J]. Control Engineering Practice, 2014, 28(1):13-25.
- [18] Sadraddini S, Sivaranjani S, Gupta V, et al. Provably safe cruise control of vehicular platoons[J]. IEEE Control Systems Letters, 2017, 1(2):262-267.