

Platoon 车辆自动控制方法及性能分析

赵海, 郭红叶, 司帅宗, 朱剑
(东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110169)

摘 要: 在车辆编队 platoon 的控制管理中领头车辆为跟随车辆周期性广播其运动参数及驾驶行为等信息是必要的. 为了保证车队稳定性和鲁棒性, 提出一种 platoon 车辆的自适应控制方法, 该方法考虑领头车辆和相邻前车的动态信息, 对包括车辆动力学和控制子系统的闭环线性系统, 采用 H_∞ 控制理论求解最优控制增益函数, 并给出系统传递函数矩阵和间距误差函数所满足的队列稳定性条件. 最后, 用该方法得到 platoon 车辆运动参数及间距误差的变化轨迹, 并对比仅考虑前车信息的控制方法. 数值结果表明所提方法的控制效果更好, 能够实现车辆的渐进跟随, 保证队列稳定性和驾驶安全性.

关 键 词: platoon; 自适应控制; H_∞ 鲁棒控制理论; 队列稳定性; 渐进跟随
中图分类号: TP 13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)06-0781-06

Automatic Control Method and Performance Analysis of Platoon Vehicles

ZHAO Hai, GUO Hong-ye, SI Shuai-zong, ZHU Jian
(School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China. Corresponding author: GUO Hong-ye, E-mail: guohongye_neu@163.com)

Abstract: The leader vehicle broadcast the information included motion parameters and driving behavior to followers is necessary in the control of platoon vehicles. To ensure the stability and robustness of platoon, an adaptive control method of vehicles was proposed, in which the motion information of leader and adjacent front vehicle became inputs of control system. The H_∞ control theory was used to solve the optimal control gain function, for closed-loop linear system contained vehicles dynamics subsystem and control subsystem, and the string stability conditions were presented that the system transfer function matrix and spacing error function satisfied. This method was used to acquire the dynamic trajectory of motion parameters and spacing error function, and was compared with the control method based on front vehicle. The numerical results showed that the asymptotic following effect of vehicles and guarantee string stability and safety of platoon could be improved by using the proposed method.

Key words: platoon; adaptive control; H_∞ robust control theory; string stability; asymptotic following

将道路上的车辆组成协同驾驶车队 platoon 的形式是智能交通系统(intelligent traffic system, ITS)中的重要研究方向, 该技术能有效提高道路容量、缓减高速公路上交通拥堵和交通事故多发的现象. Platoon 是若干智能车辆按照指定间距策略形成的高速稳定队列, 车辆能够在行驶过程中保持很小的车间距, 跟随车辆采用自动控制技术代替人为驾驶. 通过实时车间无线通信获取到周围车辆的状态^[1], 车载控制系统根据相应的控制规则协调车辆的加减速和变道等操作, 减少外界干扰或领头车辆运动状态变化引起的整个车队的动态振荡. 车辆的控制算法对于 platoon 的构建和稳定运行起关键性作用.

目前关于 platoon 控制协调策略的研究大部

分都没有显式包含 platoon 运行的队列稳定性和车辆跟随性能等重要需求^[2-3]. 在早期采用自适应巡航控制 (ACC) 技术来维持和前车期望的间距^[4-5], ACC 基于测距雷达等传感器测定距离、速度等参数实现车辆的纵向控制, 而协同自适应巡航控制 (CACC) 技术对 ACC 进行了改进^[6], 通过车载自组织网络 (vehicular ad hoc networks, VANETs) 获取周围车辆更全面的状态信息, 有效缩短了车间距并能更快响应外界干扰. 文献[7]提出基于积分滑动控制模型的车辆分布式控制策略, 但是这种控制策略仅对间距误差幅度进行了控制. 文献[8]推导了渐进稳定性及不同信息获取方式的队列稳定性, 但给出的时域控制算法流程没有具体的控制规则. 有文献研究了不同信息流拓扑和传递信息种类对 platoon 车辆动力学的 Routh - Hurwitz 内部稳定性和安全性的影响^[9], 结果表明和领头车辆保持连通的通信拓扑控制效果更好, 且仅靠车间距离来控制车辆会导致碰撞, 仍需要速度及驾驶行为等更丰富的信息. 但较多文献在基于预测信息的控制算法设计时并未考虑领头车辆信息^[10].

本文针对上述多数 platoon 控制方法未完善的问题, 提出一种基于差异补偿的 platoon 车辆 CACC 控制方法.

1 Platoon 车辆控制问题

考虑在路段中行驶的包含 n 辆车的 platoon 队列, 成员通过车间专用短程通信 (DSRC) 形成车载通信网络. Platoon 中的车辆成员包括领头车辆 (leader vehicle)、跟随车辆 (follower vehicle) 以及尾车 (tail vehicle). 其中领头车辆负责组建和管理 platoon, 协调和控制 platoon 中成员的加入和退出, 从其他车辆收集信息或者向成员广播控制信息等; 跟随车辆按照控制策略以恒定间距跟随前方车辆; 尾车负责道路上相邻 platoon 之间的信息传输. 车辆控制的目的是要保证 platoon 架构的稳定、安全运行, 实现成员车辆的渐进跟随目标, 具体描述如下:

1) 为了维持 platoon 的固定队形, 车辆的速度轨迹需跟随领头车辆的速度变化, 且当领头车辆的加速度为零时, 车辆间距的振荡误差最终能够趋向于零:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [v_i(t) - v_1(t)] = 0, \forall t \geq 0;$$

$$a_1(t) = 0, v_1(t) = v_e, \forall t \geq 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_i(t) = 0.$$

其中: i 代表 platoon 中的成员车辆编号, 从领头车辆开始, 且 $i \in [1, n]$; $v_i(t)$ 是车辆 i 的速度函数; $v_1(t)$ 和 $a_1(t)$ 是领头车辆的速度、加速度函数; $e_i(t)$ 是车辆 i 与相邻前车 $i-1$ 的间距误差函数. 上述公式表示 platoon 处于稳定状态.

2) 保证 platoon 的队列稳定性, 即领头车辆的速度、加速度误差等干扰沿着车辆纵向方向幅度衰减. 具体的队列稳定性条件在第 3 节给出.

本文基于恒定时间间距 (constant time headway, CTH) 策略研究 platoon 车辆的控制方法, 该策略设定后车与前车的时间间距相同, 而相邻车辆间的实际距离和速度相关. 达到稳定状态后的 platoon 内部车间距是一个由控制系统确定的期望值, 不仅要保证车间通信的连通性, 还要保证车辆刹车时不发生追尾碰撞的安全性. 车间距表示为

$$D_{\text{res},i}(t) = d_s + h_i v_i(t). \quad (1)$$

式中: d_s 是静止时车辆间的距离, 也是最小的安全车间距; h_i 代表车间时间间距, 对于同类型车辆组成的 platoon 该值不变. 当所有车辆的速度保持一致, 即处于稳定状态时, 期望车间距记做 $D_{\text{res},i}(t) = D_{\text{res}}$.

Platoon 的成员数量随车辆动态加入和退出车队不断发生变化, 但是为了保证 platoon 组内单跳通信连通性和队列稳定性, 其上限应该满足:

$$n_{\text{max}} \leq \left\lfloor \frac{d_{\text{con}} + D_{\text{res}}}{L + D_{\text{res}}} \right\rfloor. \quad (2)$$

其中: d_{con} 是车载通信网络中车辆的最大通信范围; L 是车身长度.

Platoon 组间间距定义为前面 platoon 尾车和后面 platoon 领头车辆之间的距离, 该参数在考虑道路容量的同时, 还要求前面 platoon 内部的动态变化不会影响后面 platoon 的稳定行驶. 所以满足的条件为

$$l - nL - \sum_{i=1}^{n-1} D_{\text{res},i} + d_s \leq D_p \leq d_{\text{con}}. \quad (3)$$

不等式右边保证 platoon 尾车能够和下一个 platoon 的领头车辆直接通信; 左边表示 platoon 间距不低于车间最小安全间距与前方 platoon 的间距干扰误差之和, 式中的 l 表示 platoon 的实际长度. Platoon 车辆控制的结果就是车辆间协同驾驶以最小误差达到预设的 platoon 关键参数.

2 车辆自适应控制方法与模型

本文设计的控制方法针对间距策略和控制增

益相同的均匀 platoon 架构, 控制系统通过获取领头车辆和相邻前方车辆的速度、加速度以及驾驶行为等状态信息作为输入, 通过相应的控制规则, 输出被控车辆期望的理论加速度, 进而由车辆的动力学传动系统转换成车辆的发动机力矩和转向角. 在给出车辆控制方法之前需了解车辆的动力学模型, 采用状态反馈输入输出线性化方法可以得到简化的线性模型:

$$\left. \begin{aligned} \dot{d}_i(t) &= v_{i-1}(t) - v_i(t), \\ \dot{d}_{i1}(t) &= v_1(t) - v_i(t), \\ \dot{v}_i(t) &= a_i(t), \\ \zeta_i \dot{a}_i(t) + a_i(t) &= u_i(t), 2 \leq i \leq m. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中: $u_i(t)$ 是车载控制系统输出的期望加速度; ζ_i 是车载动力学装置的固有滞后量; $d_{i1}(t)$ 是车辆 i 和领头车辆的间距函数. 车辆之间实际距离和期望车间距的误差函数可以表示为

$$e_i(t) = d_i(t) - D_{\text{res},i}(t) = [q_{i-1}(t) - q_i(t) - L] - [d_s + h_i v_i(t)]. \quad (5)$$

式中: $q_i(t)$, $q_{i-1}(t)$, $d_i(t)$ 分别表示车辆 i 和车辆 $i-1$ 的位置函数以及两车间的实际距离, 通过对 $e_i(t)$ 求一阶导、二阶导, 得到和相邻前车的速度差值以及加速度差值的相关信息, 求导公式:

$$e_i^v(t) = \dot{e}_i(t) = v_{i-1}(t) - v_i(t) - h \dot{a}_i(t), \quad (6)$$

$$e_i^a(t) = \ddot{e}_i(t) = a_{i-1}(t) - a_i(t) - h \ddot{a}_i(t). \quad (7)$$

通过获取领头车辆的信息可以防止队列的不稳定, 所以对仅考虑相邻前车信息的跟车控制模型进行改进得到 platoon 车辆自适应控制模型:

$$\begin{aligned} z_i(t) &= k_e(t) * e_i(t) + k_v(t) * \frac{de_i(t)}{dt} + \\ &k_a(t) * \frac{d^2 e_i(t)}{dt^2} + k_{fp}(t) * u_{i-1}(t - \tau) + \\ &k_n(t) * u_1(t - \tau). \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $z_i(t)$ 是输入信息经控制后的加权信息; 符号 $*$ 代表卷积. $u_1(t)$, $u_{i-1}(t)$ 是领头车辆和前车的加速度函数, $k_e(t)$, $k_v(t)$, $k_a(t)$ 分别表示车辆 i 和前车 $i-1$ 的间距误差、速度误差和加速度误差的频域控制增益, 而 $k_{fp}(t)$ 和 $k_n(t)$ 是前车和领头车辆加速度的频域控制增益. τ 是车辆间传递信息的通信延时, 假设同时接收到来自相邻前车和领头车辆的信息, 且所有车辆的车载收发设备相同, 所以 τ 恒定.

根据 CTH 间距策略传递函数有

$$z_i(t) = h \frac{d}{dt} u_i(t) + u_i(t). \quad (9)$$

联立式(4)~式(9)可以得到车辆子系统的状态空间闭环模型, 表示为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{e}_i(t) \\ \dot{e}_i^v(t) \\ \dot{e}_i^a(t) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_e}{\zeta} & -\frac{k_v}{\zeta} & -\frac{k_a+1}{\zeta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_i(t) \\ e_i^v(t) \\ e_i^a(t) \end{pmatrix} + \\ &\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{k_n}{\zeta} & \frac{1-k_{fp}}{\zeta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{u}_1(t) \\ \tilde{u}_{i-1}(t) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $\tilde{u}_1(t)$ 和 $\tilde{u}_{i-1}(t)$ 表示经过延时后的信息. 可以看出车辆控制的本质就是对被控车辆和相邻前车以及领头车辆的参数差异进行补偿, 减少外界干扰引起的动态变化.

与车辆自适应控制算法相对应的车辆闭环线性系统设计框图如图 1 所示. 在框图中, 记 CTH 间距策略传递函数为

$$D(s) = \frac{u_i(s)}{z_i(s)} = \frac{1}{hs+1}. \quad (11)$$

设车辆动力学传递函数, 即控制系统的输出期望加速度和车辆位置信号拉氏变换的关系为^[10]

$$G(s) = \frac{q_i(s)}{u_i(s)} = \frac{1}{s^2(\zeta s+1)} e^{-\varphi s}. \quad (12)$$

式中: 滞后常量 ζ 为定值; φ 代表制动装置时间延时. 设车间通信时延的频域表达为 $T(s) = e^{-\tau s}$. $W_{i-1}(s)$ 表示领头车辆对于车辆 $i-1$ 的加速度传递函数.

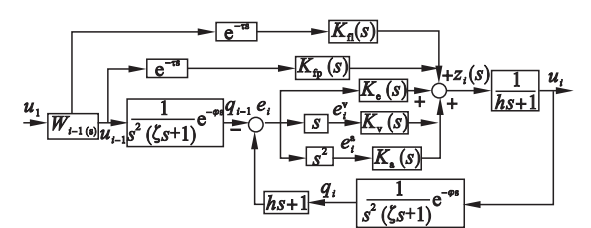


图 1 车辆闭环线性系统框图
Fig. 1 Closed loop linear system diagram of vehicle

采用 H_∞ 优化控制理论分析上述包含被控车辆子系统和控制子系统的闭环线性系统, 为得到控制增益函数的表达, 先求出广义对象, 即去掉控制子系统部分后输入和输出矩阵之间的传递函数矩阵. 再基于线性矩阵不等式的方法得到有理高阶控制增益 $k_e(t)$, $k_v(t)$, $k_a(t)$, $k_{fp}(t)$, $k_n(t)$, 优化目标为闭环系统满足内部稳定性, 即传递函数矩阵的无穷范数最小.

联立式(8)、式(9)及式(11)、式(12)并求拉普拉斯变换, 得到控制子系统的输出为

$$u_i(s) = D(s) \{ [k_e(s) + s k_v(s) + s^2 k_a(s)] e_i(s) + k_{fp}(s) T(s) u_{i-1}(s) + k_n(s) T(s) u_1(s) \} =$$

$$D(s)z_i(s). \quad (13)$$

间距误差的拉普拉斯变换为

$$e_i(s) = u_1(s)W_{i-1}(s)G(s) - u_i(s)G(s)D^{-1}(s). \quad (14)$$

整理可得控制输出信号和领头车辆以及前车加权输入信号之间关系的频域表达:

$$u_i(s) = D(s) \times \frac{G(s)[k_e(s) + sk_v(s) + s^2k_a(s)] + k_{fp}(s)T(s)}{1 + G(s)[k_e(s) + sk_v(s) + s^2k_a(s)]} \times u_{i-1}(s) + \frac{D(s)k_n(s)T(s)}{1 + G(s)[k_e(s) + sk_v(s) + s^2k_a(s)]} u_1(s). \quad (15)$$

加速度拉氏变换 $u_{i-1}(s)$ 和 $u_1(s)$ 前面的系数函数即为相应的控制传递函数,运用线性系统输入输出响应计算方法,输入时域信号 $u_{i-1}(t)$ 和 $u_1(t)$ 即可得到车辆 i 的期望加速度函数.

3 稳定性分析

用第 i 辆车加速度和领头车辆加速度的拉普拉斯变换的比值来描述队列稳定性,传递函数如下:

$$W_i(s) = \frac{u_i(s)}{u_1(s)} = \left\{ \frac{W_{i-1}(s)G(s)[k_e(s) + sk_v(s) + s^2k_a(s)]}{1 + G(s)[k_e(s) + sk_v(s) + s^2k_a(s)]} + \frac{[k_{fp}(s)W_{i-1}(s) + k_n(s)]T(s)}{1 + G(s)[k_e(s) + sk_v(s) + s^2k_a(s)]} \right\} D(s). \quad (16)$$

记 $W_1(s) = 1$, 对于编号为 2 的车辆,则只能接收来自领头车辆的信息作为控制模型的参考信息. 队列稳定性要求传递函数的无穷范数满足以下条件^[11]:

$$\left\| \frac{W_i(s)}{W_{i-1}(s)} \right\|_{\infty} = \left\| \frac{u_i(s)}{u_{i-1}(s)} \right\|_{\infty} = \sup_{u_1(t) \in L_2} \frac{\left\| u_i(t) \right\|_2}{\left\| u_{i-1}(t) \right\|_2} \leq 1. \quad (17)$$

$W_i(s)$ 可以用 $W_i(j\omega)$ 代替,故而若系统满足 $|W_i(j\omega)/W_{i-1}(j\omega)| \leq 1, \forall i \in [1, n]$, 可保证加速度幅度沿着 platoon 成员呈衰减趋势的队列稳定性. 本文控制模型系统传递函数的频域响应如图 2 所示, 可以看到 $|W_i(j\omega)|$ 恒小于 1 且随车辆编号的增大逐渐下降, 即车辆 i 的加速度幅值不会超过车辆 $i-1$. 而根据车辆动力学模型有 $u_{i-1}(t-\tau) = \zeta_{i-1}\dot{a}_{i-1}(t-\tau) + a_{i-1}(t-\tau). \quad (18)$

则根据车辆动力学模型和控制模型时域表达可以得到速度误差的传递函数如下:

$$H_v(s) = \frac{v_i(s)}{v_{i-1}(s)} = \frac{(k_a + k_{fp}\zeta e^{-\tau s})s^2 + (k_v + k_n e^{-\tau s})s + k_e}{h\zeta s^4 + (1 + \zeta + k_a h)s^3 + (1 + h + k_a)s^2 + (k_e h + k_v)s + k_e}. \quad (19)$$

可以验证间距误差传递函数满足

$$H_e(s) = e_i(s)/e_{i-1}(s) = H_v(s). \quad (20)$$

若对任意频率 $\omega > 0$ 满足式 (21) 的条件, 则可以保证

$$|H_e(j\omega)| = |H_v(j\omega)| = |e_i(j\omega)/e_{i-1}(j\omega)| \leq 1.$$

即速度、间距振荡误差沿 platoon 纵向方向呈衰减趋势, 形成的 platoon 是队列稳定的, 这里为了简化忽略通信延时.

$$\begin{aligned} 1 - 2h\zeta(1+h) + 2\zeta + \zeta^2 + k_a h(k_a h + 2) &\geq 0. \\ (h+1)(2k_a + h+1) + 2h\zeta k_e - 2(k_e h + k_v) &\cdot \\ (1 + \zeta + k_a h) - k_{fp}^2 \zeta^2 - 2k_a k_{fp} \zeta &\geq 0, -2k_e(1+h) + \\ (k_e h + k_v)^2 - (k_v + k_{fp}) + 2k_e k_{fp} \zeta &\geq 0. \end{aligned} \quad (21)$$

同理, 对本文的高阶控制增益函数, 用 $|k_j(j\omega)|$ 代替式 (21) 中的 k_j 可得到相应的队列稳定性条件.

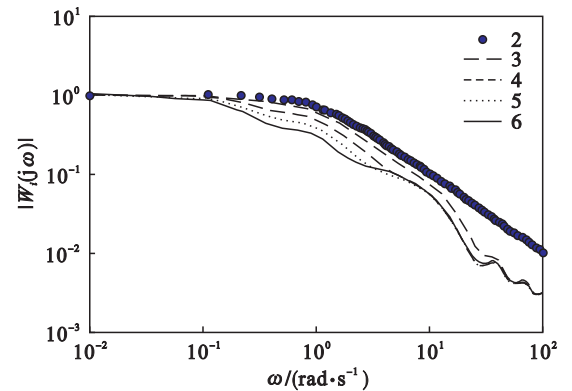


图 2 系统函数的频率响应幅度

Fig. 2 Frequency response magnitude of system function

4 实验分析与讨论

将本文提出的基于领头车辆和前车信息的控制方法与仅考虑前车信息的控制方法进行对比, 证明领头车辆广播信息对提高 platoon 车辆跟随性能及有效保证队列稳定性的作用. 设定 platoon 成员车辆数量为 6, 基于组成 platoon 的车辆类型相同的假设, 相邻车辆间的时间间距 h 都设置为 1 s; 仿真采用的车载通信网络信息传输延时要求在基于 IEEE 802. 11p 标准的车间通信延时典型

上限值以内^[7],其在频域的传递函数采用三阶 Padé 逼近来近似,其他相关参数设置如表 1 所示. 设定领头车辆加速度 a_1 在 $t \in [5, 15] \text{ s}$ 内为 2 m/s^2 , $t \in [25, 30] \text{ s}$ 内为 -4 m/s^2 ,其余仿真时间内为 0 m/s^2 . 首先利用线性矩阵不等式的方法求解控制模型,简化后得到 6 阶控制增益函数,进而求得系统传递函数,输入领头车辆和相邻前车的状态信息,线性系统的输出即为不同车辆成员的运动参数.

图 3 是应用基于领头车辆和前车信息的控制方法得到的 platoon 中 6 辆成员车的加速度、速度、车辆位置轨迹和间距误差的时域响应函数. 可以看到,头车的加速度轨迹为平滑的梯形,车辆 2 到车辆 6 的加速度随之同步变化,且沿着 platoon 中车辆的纵向方向加速度响应传播的幅度下降,不会超过头车的加速度阈值. 成员车辆的速度变化趋势同样跟随头车的加减速同步变化.

表 1 仿真参数设置			
Table 1 Simulation parameters setting			
参数	取值	参数	取值
滞后量 ζ/s	0.1	稳定车间距 D_{res}/m	6
时间常数 φ/s	0.2	车辆通信范围 d_{con}/m	450
通信时延 τ/s	0.02	静止车间距 d_s/m	2
车长 L/m	4	时间间距 h/s	1

图 4 是采用基于前车信息控制方法得到的 platoon 中 6 辆成员车的加速度、速度、车辆位置和间距误差的时域响应函数. 通过和图 3 的仿真结果进行对比,可以得到,仅考虑前车信息的控制方法得到的车辆加速度、速度曲线也保持了一定的跟随效果,但是由于获取的信息不足以及时响应头车的运动状态变化,所以时域响应产生了很大的滞后.

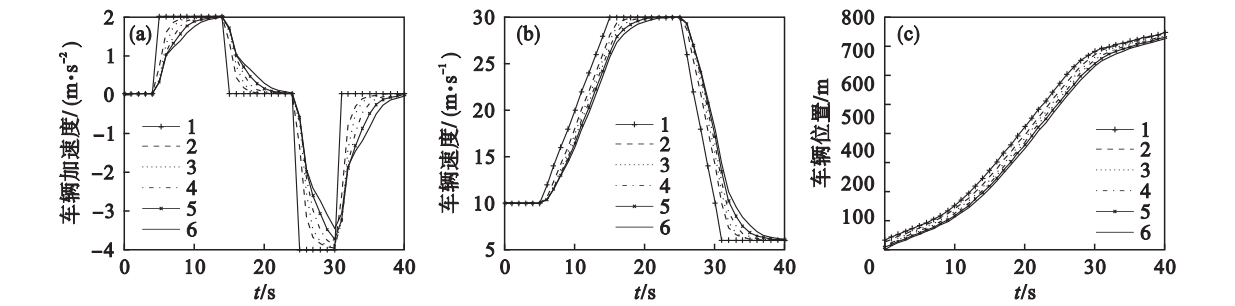


图 3 基于领头车辆和前车信息控制方法的 platoon 车辆状态

Fig. 3 Parameters of platoon vehicles based on control method considered leader and front vehicle information

(a)—加速度函数; (b)—速度函数; (c)—位置轨迹.

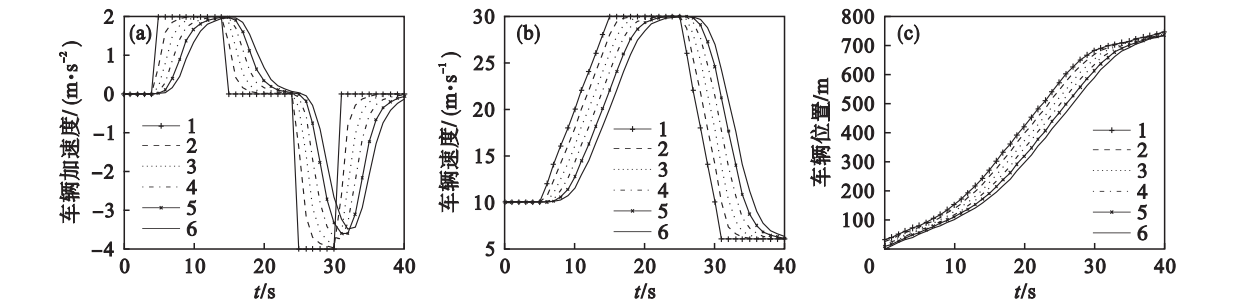


图 4 基于前车信息控制方法的 platoon 车辆状态

Fig. 4 Parameters of platoon vehicles based on control method considered front vehicle information

(a)—加速度函数; (b)—速度函数; (c)—位置轨迹.

图 5 是本文控制方法和仅考虑前车信息控制方法的相邻车辆间距误差振荡曲线. 图 5a 呈现出依赖车辆加速度的行为,在每次加速度变化时,间距误差上下振荡,但是在领头车辆的干扰消除后幅度最终趋向于零,实现了车辆的渐进跟随. 在相同的领头车辆加速度变化干扰条件下,图 5b 间距

误差函数虽然满足了车辆的跟随效果,但其振荡幅度却显著大于图 5a 的误差曲线. 表明 platoon 内部间距在车辆行驶过程中受干扰的影响抖动较大,不易恢复稳定状态,故而不能很好地保证 platoon 队列的稳定性.

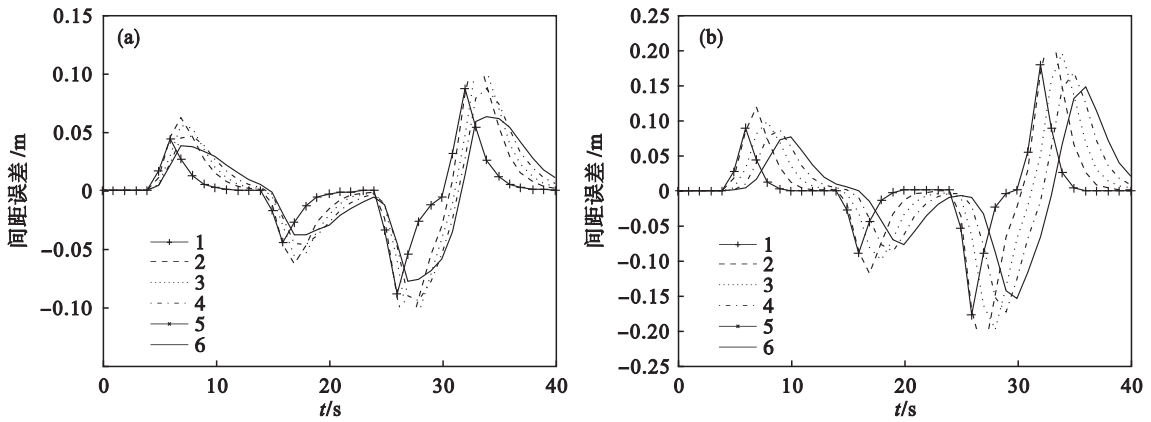


图 5 不同控制方法的间距误差函数
Fig. 5 Spacing error functions from different control methods
(a)—基于领头车辆和前车信息; (b)—基于前车信息.

5 结 论

本文采用补偿车辆间运动参数误差的方法,提出一种基于 CACC 的 platoon 车辆自适应控制方法. 该方法将领头车辆和相邻前车的运动参数输入到由车辆动力学和控制子系统组成的闭环线性系统,得到车辆的加速度,通过 H_∞ 鲁棒控制理论得到最优的高阶控制增益函数. 同时推导并验证了加速度传递函数以及速度、间距误差幅度沿着 platoon 队列衰减的队列稳定条件. 并将所提方法和仅考虑前车信息的控制方法对 6 车 platoon 的控制效果进行对比,仿真结果验证了本文方法能够显著改善车辆的渐进跟随效果,并能保证队列稳定性和驾驶安全性. 进一步工作将研究车间通信延时、丢包率以及网络容量限制等对车辆控制方法和 platoon 运行性能的影响.

参考文献:

[1] Amoozadeh M, Deng H, Chuah C N, et al. Platoon management with cooperative adaptive cruise control enabled by VANET [J]. *Vehicular Communications*, 2015, 2 (2) : 110 – 123.
[2] Hao H, Barooah P. Stability and robustness of large platoons of vehicles with double-integrator models and nearest neighbor interaction [J]. *International Journal of Robust & Nonlinear Control*, 2013, 23 (18) : 2097 – 2122.
[3] Bernardo M D, Falcone P, Salvi A, et al. Design, analysis, and experimental validation of a distributed protocol for

platooning in the presence of time-varying heterogeneous delays [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24 (2) : 413 – 427.
[4] 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.
[5] Jia D, Lu K, Wang J. A disturbance-adaptive design for VANET-enabled vehicle platoon [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63 (2) : 527 – 539.
[6] Dey K C, Yan L, Wang X, et al. A review of communication, driver characteristics, and controls aspects of cooperative adaptive cruise control (CACC) [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17 (2) : 491 – 509.
[7] Guo X, Wang J, Liao F, et al. Distributed adaptive integrated-sliding-mode controller synthesis for string stability of vehicle platoons [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17 (9) : 2419 – 2429.
[8] Bernardo M D, Salvi A, Santini S. Distributed consensus strategy for platooning of vehicles in the presence of time-varying heterogeneous communication delays [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 16 (1) : 102 – 112.
[9] Xu L, Wang L Y, Yin G, et al. Communication information structures and contents for enhanced safety of highway vehicle platoons [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63 (9) : 4206 – 4220.
[10] Ploeg J, Shukla D P, van de Wouw N, et al. Controller synthesis for string stability of vehicle platoons [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15 (2) : 854 – 865.
[11] Ploeg J, van de Wouw N, Nijmeijer H. Lp string stability of cascaded systems: application to vehicle platooning [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22 (2) : 786 – 793.