



## 协同式多目标自适应巡航控制

章军辉 李庆 陈大鹏

### Multi-objective adaptive cruise control (ACC) algorithm for cooperative ACC platooning

ZHANG Jun-hui, LI Qing, CHEN Da-peng

引用本文:

章军辉, 李庆, 陈大鹏. 协同式多目标自适应巡航控制[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(4): 423–433. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2019.05.21.002

ZHANG Jun-hui, LI Qing, CHEN Da-peng. Multi-objective adaptive cruise control (ACC) algorithm for cooperative ACC platooning[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(4): 423–433. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2019.05.21.002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.05.21.002>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [基于预瞄距离的地下矿用铰接车路径跟踪预测控制](#)

Path following control of underground mining articulated vehicle based on the preview control method

*工程科学学报*. 2019, 41(5): 662 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.05.013>

#### [多模型自适应控制理论及应用](#)

Survey of multi-model adaptive control theory and its applications

*工程科学学报*. 2020, 42(2): 135 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.02.25.006>

#### [含有自校正模型的加权多模型自适应控制](#)

Weighted multiple model adaptive control with self-tuning model

*工程科学学报*. 2018, 40(11): 1389 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.11.013>

#### [基于非线性模型预测控制的自动泊车路径跟踪](#)

Path tracking of automatic parking based on nonlinear model predictive control

*工程科学学报*. 2019, 41(7): 947 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.07.014>

#### [基于自适应滑模的多螺旋桨浮空器容错控制](#)

Fault-tolerant control for a multi-propeller airship based on adaptive sliding mode method

*工程科学学报*. 2020, 42(3): 372 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.04.25.002>

# 协同式多目标自适应巡航控制

章军辉<sup>1,2,3)</sup>, 李 庆<sup>1,2,3)</sup>, 陈大鹏<sup>1,2,3)</sup>✉

1) 中国科学院微电子研究所, 北京 100029 2) 江苏物联网研究发展中心, 无锡 214135 3) 无锡物联网创新中心有限公司, 无锡 214135  
✉通信作者, E-mail: [dpchen@ime.ac.cn](mailto:dpchen@ime.ac.cn)

**摘 要** 针对自动化高速公路(Automated highway system, AHS)车队稳定性问题, 发展了一种多目标自适应巡航控制算法, 根据李雅普诺夫(Lyapunov)稳定性理论对该问题进行了量化分析, 并给出了同质与异质车队稳定性的设计要求, 基于模型预测控制(Model predictive control, MPC)理论, 综合协调驾驶员期望响应、跟驰安全性、车队稳定性、车队整体品质等控制目标, 采用加权二次型性能泛函以及线性矩阵不等式约束的形式, 将协同式多目标自适应巡航(Adaptive cruise control, ACC)设计问题最终转化成带约束的在线凸二次规划问题。仿真结果表明, 相比单车 ACC 而言, 协同 ACC 的约束空间更为严苛, 车队互联系统稳定性易受车间时距、车队规模、多目标权重、瞬态工况、车辆异质性等因素的影响, 建议在跟驰安全性、车队稳定性良好的前提下寻求一定的驾乘舒适性与燃油经济性, 以确保车队整体品质。

**关键词** 自动化高速公路; 车队稳定性; 协同自适应巡航控制; 模型预测控制

**分类号** U461.91

## Multi-objective adaptive cruise control (ACC) algorithm for cooperative ACC platooning

ZHANG Jun-hui<sup>1,2,3)</sup>, LI Qing<sup>1,2,3)</sup>, CHEN Da-peng<sup>1,2,3)</sup>✉

1) Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2) Jiangsu R&D Center for Internet of Things, Wuxi 214135, China

3) Wuxi Internet of Things Innovation Center Co., Ltd., Wuxi 214135, China

✉ Corresponding author, E-mail: [dpchen@ime.ac.cn](mailto:dpchen@ime.ac.cn)

**ABSTRACT** With the rapid progress of the automated highway system, the issue of platoon stability, which might significantly affect highway traffic characteristics, such as traffic efficiency, traffic capacity, and traffic safety, has attracted considerable attention. A string of vehicles equipped with adaptive cruise control (ACC) and moving longitudinally in an automated manner is regarded as an autonomous vehicle platooning system. During car following, the quality of the ride could be poor and rear-end collisions could occur, particularly if the spacing and velocity errors are amplified to some extent as they propagate upstream. Research on platoon stability has been the focus of significant interest. However, a method to coordinate multiple sub-objectives dynamically during autonomous vehicle platooning against multiple traffic scenarios has not yet been developed. In this study, a multi-objective ACC algorithm for cooperative adaptive cruise control (CACC) platooning based on vehicle-to-vehicle (V2V) real-time communication technology, which enabled the interconnection of vehicles within a limited range to share vehicle position and motion state information, was thus proposed. The quantization of homogeneous and heterogeneous platoon stability was analyzed on the basis of the Lyapunov stability theory. Furthermore, on the basis of the model predictive control framework, the coordination among various conflicting sub-objectives, such as

收稿日期: 2019-05-21

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划资助项目(STS 计划); 面向智能驾驶的新能源汽车电子开放平台建设与产业化资助项目(KFJ-STZ-ZDTP-045)

driver-desired car-following response, rear-end safety, platoon stability, and platoon overall quality, was comprehensively considered. Then, by utilizing a quadratic cost function with linear multi-constraints, the design of the multi-objective CACC was transformed into the convex quadratic programming problem with multiple constraints. The comparative simulations show that the I/O constraints and slack relaxation of platoon control are strict, indicating that platoon stability is easily affected by certain factors, such as time gap, platoon size, sub-objective weight coefficient, transient traffic scenarios, and heterogeneous features. Thus, rear-end safety and platoon stability should be prioritized to guarantee the overall quality of the platoon.

**KEY WORDS** automated highway system; platoon stability; cooperative adaptive cruise control; model predictive control

早期自适应巡航(Adaptive cruise control, ACC)系统设计主要是为了满足驾乘舒适性与车辆安全性需求,而随着智能交通系统(Intelligent transportation system, ITS)的快速发展,利用自动化高速公路(Automated highway system, AHS)来加强高速公路安全建设,缓解交通拥堵以及改善道路通行能力已引起研究人员与汽车制造商的高度重视<sup>[1-4]</sup>.

目前,量产 ACC 普遍采用固定时距(Constant time headway, CTH)策略<sup>[1,5]</sup>,该策略下对车间时距的选取极具挑战性.当时距预设过小时,会造成驾乘人员心理紧张不适,亦增加了追尾碰撞的潜在可能性,而当时距预设过大时,不仅会降低道路通行能力与吞吐量,还可能会诱发邻道车辆并线、强插等不文明事件.

单车 ACC 系统设计时,对车间时距的选取,主要基于前后两车之间的跟驰安全性考虑<sup>[6-7]</sup>.国外如英国与法国给出的时距参考值为 2.0 s,德国的为 1.8 s<sup>[8]</sup>,这些时距预设值相对偏保守,会造成一定的道路交通带宽浪费.此外,不同驾驶群体对车间时距预设的偏好不一,存在用户体验友好性不足的问题,从而离线参数标定、在线学习更新亦成为一种设计趋势<sup>[9-10]</sup>.

多车协同自适应巡航控制(Cooperative adaptive cruise control, CACC)作为 AHS 的典型应用,已成为研究前沿与热点.文献[1]通过搭载毫米波雷达来组建 Radar\_ACC 车队,采用滑模控制(Sliding mode control, SMC)方法,着重分析了车间时距的选取对车队稳定性的影响.文献[2]分别搭建了基于毫米波雷达的 Radar\_ACC 车队,以及基于车车(Vehicle-to-vehicle, V2V)通信的 V2V\_ACC 车队,采用  $H_\infty$  控制方法,并给出 Radar\_ACC 车队稳定所要求的最小车间时距要大于 V2V\_ACC 车队的最小车间时距这一结论,从而也进一步表明 V2V 通信技术对道路通行能力的提升具有潜在优势.文献[3]提出了一种最小安全车距的 ACC 车队控制策略,以避免由于前车加速度的不确定性而可能会导致的追尾事件.

关于多车协同控制系统稳定性问题,除了上述车间时距外,车队规模、瞬态工况、控制器设计(如巡航过程中控制目标权重分配、控制策略等)、车辆动力学特性、非常态环境等因素皆有可能影响到车队稳定性以及车队整体品质(如车队响应时间、车距误差束波动幅度、工况适应能力等),因而,本文将对此进一步展开.首先,考虑到 V2V 通信技术的先进性与优越性<sup>[11]</sup>,本文搭建了基于 V2V 通信的 CACC 车队模型,分别对同质与异质车队稳定性进行了量化分析.接着,基于模型预测控制(Model predictive control, MPC)理论,综合协调驾驶员期望响应(如动态追踪性能、燃油经济性能、驾乘舒适性能等)、跟驰安全性、车队稳定性、车队整体品质等控制目标.最后,设计了稳态舒缓工况、瞬态急加速工况以及瞬态急减速工况,对巡航过程中的车队稳定性、车队整体品质等车队响应进行了分析与探讨.

## 1 CACC 车队稳定性

V2V 车车通信技术能够实现一定范围内车辆之间速度、位置、油门、制动等信息实时可靠传递与共享,从而可将搭载 V2V 通信模块的 CACC 车队视为一个互联系统.图 1 为 CACC 车队互联系统示意图,其中编号为 0 的视为领车.

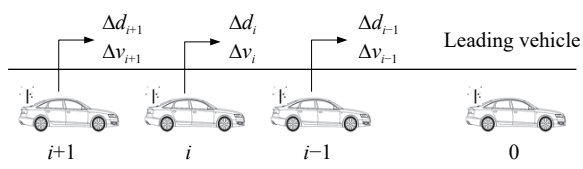


图 1 搭载 V2V 模块的 CACC 车队示意图

Fig.1 Sketch of CACC platoon equipped with V2V real-time communication technology

根据李雅普诺夫稳定性定理,作如下定义.

**定义 1** 车队互联系统稳定性

$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0$ , 皆有  $\sup_{i \in \mathbb{N}} |\Delta d_i(0)| < \delta \Rightarrow \sup_{i \in \mathbb{N}} |\Delta d_i(t)| < \varepsilon$ ,  $\forall t \geq 0$  成立.

**定义 2** 车队互联系统渐近稳定性

$\exists \delta > 0$ , 使得  $\sup_{i \in \mathbb{N}} |\Delta d_i(0)| < \delta \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \sup_{i \in \mathbb{N}} |\Delta d_i(t)| = 0$  成立。

式中,  $\Delta d_i = d_i - d_{i,des}$  为车队中第  $i(i \geq 1)$  辆车与第  $i-1$  辆车之间的车距误差,  $d_i$  与  $d_{i,des}$  分别为第  $i$  辆车与第  $i-1$  辆车之间的实际车距与期望车距,  $\Delta v_i(t) = v_{i-1}(t) - v_i(t)$  为第  $i$  辆车与第  $i-1$  辆车之间的相对速度,  $t$  为时间。

车队互联系统稳定则要求车队头部车距误差不会朝着车队尾部放大传播<sup>[1-2]</sup>。车距误差是否衰减传播可由传递函数的无穷范数来判定, 若车距误差传递函数的  $L_\infty$  范数不大于 1, 则车队互联系统是稳定的, 即

$$\|H_i(s)\|_\infty = \left\| \frac{\Delta d_{i+1}}{\Delta d_i} \right\|_\infty \leq 1 \quad (1)$$

式中,  $H_i(s)$  为车队互联系统车距误差传递函数,  $s$  表示  $s$  域。

### 1.1 同质车队

假设每辆车所采用的控制律、CTH 策略、车辆动力学特性等皆完全一致, 即同质车队。

研究<sup>[1]</sup>表明, 同质车队稳定的条件为

$$\tau_h > 2(T_L + T_D) \quad (2)$$

式中,  $\tau_h$  为同质车队中邻车间的时距,  $T_L$  为车辆执行系时滞,  $T_D$  为通信时延。

当忽略时延  $T_D$  时, 选取大于  $2T_L$  的时距  $\tau_h$ , 可维持车队稳定性; 当忽略时滞  $T_L$  时, 选取大于  $2T_D$  的时距  $\tau_h$ , 可维持车队稳定性。

### 1.2 异质车队

同质车队适宜于诸如物流车队等特殊作业场景, 其稳定性分析具有一定的工程参考价值。而实际应用中, 由于汽车制造商、零部件供应商等之间没有统一的设计标准, ACC 预设时距、控制律、车辆执行系等一般都存在着差异性。

研究<sup>[1]</sup>表明, 异质车队稳定的条件为

$$\begin{cases} \|G_i(s)\|_\infty \leq 1 \\ \|H_i(s)\|_\infty \leq \frac{\tau_{i+1}}{\tau_i} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $G_i(s) = \frac{v_i}{v_{i-1}}$  为车队互联系统速度传递函数,  $\tau_i$  为异质车队中邻车间的时距。

综上, 同质车队稳定时, 车距误差呈衰减传播趋势; 而对于异质车队, 一则要求速度追踪能力, 二则要求车距误差收敛于平衡点邻域范围内的保持能力。

当车队规模较小时, 可适度放宽对上述条件的约束, 而当突发瞬态工况时, 又会进一步收紧约束, 此外, 多目标权重分配、路面附着能力等因素

也会影响到车队稳定性, 故需综合考虑这些实际因素来探讨车队稳定性。

## 2 多目标协同控制算法

如图 2 所示, CACC 系统采用自顶向下式设计, 其基本思路是: 基于既定的纵向期望车距策略, 决策控制层对协同跟随过程中多个且彼此相互冲突的子目标进行综合协调控制, 寻求满足各个性能指标最优折衷时的自车纵向期望加速度  $a_{i,des}$ ; 执行层通过控制油门/制动踏板使得自车的实际加速度  $a_i$  收敛于决策层输出的期望加速度  $a_{i,des}$ 。其中,  $i(i \geq 1)$  代表协同跟随过程中的第  $i$  辆车的编号,  $\theta_i$ 、 $P_{i,brk}$  分别为节气门开度与制动压力。

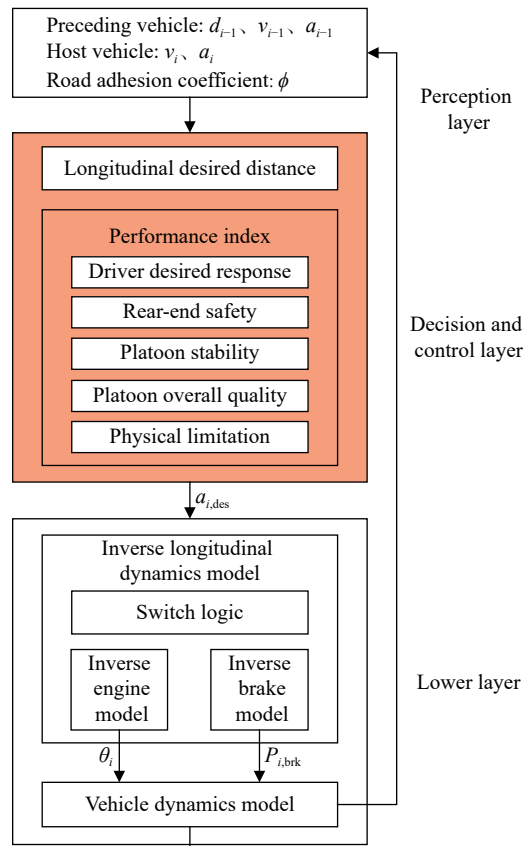


图 2 CACC 分层设计

Fig.2 Hierarchical architecture of CACC

### 2.1 数学建模

#### 2.1.1 纵向运动学模型

如图 3 所示, 为方便分析, 将车队中第  $i(i \geq 1)$  辆车视为自车, 第  $i-1$  辆车视为前车, 当  $i=1$  时, 前车即为领车, 亦不失一般性。

假设期望车距采用 CTH 策略, 车辆执行系满足一阶惯性环节。根据纵向跟车运动学特性, 令



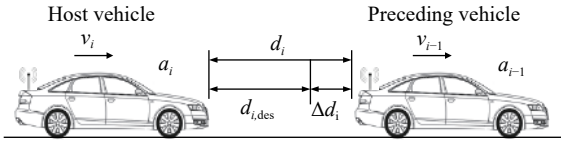


图 3 CACC 纵向运动学示意图

Fig.3 Longitudinal inter-vehicle dynamics of CACC

$\mathbf{x}(k) = [\Delta d_i(k), \Delta v_i(k), a_i(k)]^T$ , 以  $\mathbf{x}(k)$  为状态向量,  $u_i(k)$  为控制输入, 前车加速度  $a_{i-1}(k)$  为系统扰动,  $y(k)$  为系统输出, 采用差分近似法建立离散状态空间方程

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}u_i(k) + \mathbf{G}\varphi_i(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $u_i(k) = a_{i,des}(k)$ ,  $\varphi_i(k) = a_{i-1}(k)$ ,  $k$  为离散时间, 各系数矩阵满足

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T_s & -\tau_i T_s \\ 0 & 1 & -T_s \\ 0 & 0 & 1 - T_s T_{i,L}^{-1} \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \mathbf{B} &= [0, 0, T_s K_{i,L} T_{i,L}^{-1}]^T \\ \mathbf{G} &= [0, T_s, 0]^T \\ \mathbf{C} &= \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{aligned}$$

其中,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵,  $K_{i,L}$  为增益,  $T_{i,L}$  为时间常数。

### 2.1.2 鲁棒设计

考虑到工程实际路面附着情况, 对 CTH 策略中的零速度车距  $d_0$  进一步修正, 以补偿路面湿滑所导致较长的安全制动距离。

$$d_0 \triangleq \begin{cases} d_0, & \phi > \phi_0 \\ \eta d_0, & \phi \leq \phi_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\phi$  为路面附着系数,  $\phi_0$  为参考值,  $\eta$  为修正系数。

此外, 为提高式 (4) 对真实系统的辨识表达能力, 基于闭环反馈校正思想, 引入误差修正项  $\mathbf{e}(k)$ , 以期提高模型预测精度以及抗干扰能力<sup>[12]</sup>。

所以, 将式 (4) 改写成

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}u(k) + \mathbf{G}\varphi(k) + \mathbf{M}\mathbf{e}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{M} = \text{diag}(m_1, m_2, m_3)$  为校正矩阵,  $\mathbf{e}(k) = \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}(k|k-1)$  为误差修正项, 其中,  $\mathbf{x}(k)$  为  $k$  时刻系统实际状态,  $\mathbf{x}(k|k-1)$  表示  $k-1$  时刻对  $k$  时刻状态的预测。

### 2.1.3 $p$ 步预测模型

假设当前时刻为  $k$ ,  $p$  步预测时域为  $[k, k+p-1]$ , 由离散状态空间方程 (6), 逐步迭代并整理得

$$\begin{cases} \mathbf{X} = \mathbf{A}_p \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_p \mathbf{U} + \mathbf{G}_p \Phi + \mathbf{M}_p \mathbf{e}(k) \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}_p \mathbf{X} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{X} = [\mathbf{x}(k+1|k), \mathbf{x}(k+2|k), \dots, \mathbf{x}(k+p|k)]^T$ ,  $\mathbf{U} = [u_i(k), u_i(k+1), \dots, u_i(k+p-1)]^T$ ,  $\Phi = [\varphi_i(k), \varphi_i(k+1), \dots,$

$\varphi_i(k+p-1)]^T$  分别为预测时域的状态序列、控制序列、扰动序列,  $\mathbf{Y}$  为系统输出序列, 各系数矩阵满足

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_p &= [\mathbf{A}, \mathbf{A}^2, \dots, \mathbf{A}^p]^T \\ \mathbf{B}_p &= \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}\mathbf{B} & \mathbf{B} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}^{p-1}\mathbf{B} & \mathbf{A}^{p-2}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{B} \end{bmatrix}_{3p \times p} \\ \mathbf{G}_p &= \begin{bmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}\mathbf{G} & \mathbf{G} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}^{p-1}\mathbf{G} & \mathbf{A}^{p-2}\mathbf{G} & \dots & \mathbf{G} \end{bmatrix}_{3p \times p} \\ \mathbf{M}_p &= [\mathbf{M}, \mathbf{A}\mathbf{M}, \dots, \mathbf{A}^{p-1}\mathbf{M}]^T \\ \mathbf{C}_p &= \text{diag}(\mathbf{C}, \mathbf{C}, \dots, \mathbf{C}) \end{aligned}$$

## 2.2 控制目标分析

### 2.2.1 驾驶员期望响应

采用二次型形式来间接表征动态追踪性能、燃油经济性能、驾乘舒适性能等性能指标, 建立起相应的性能泛函, 作为待优化的子目标<sup>[13]</sup>。

#### (1) 动态追踪性。

动态追踪性间接评价方法<sup>[14]</sup>: 车距误差  $\Delta d_i$  与相对车速  $\Delta v_i$  皆收敛于期望邻域  $U(0, \sigma)$  内的能力, 其中,  $\sigma$  为邻域半径。其二次型表示为

$$J_T = w_{\Delta d_i} \Delta d_i^2 + w_{\Delta v_i} \Delta v_i^2 \quad (8)$$

式中,  $w_{\Delta d_i}$ 、 $w_{\Delta v_i}$  分别为  $\Delta d_i$  与  $\Delta v_i$  的权重系数。

#### (2) 燃油经济性。

燃油经济性间接评价方法<sup>[15]</sup>: 利用期望加速度  $a_{i,des}$  与冲击度  $j_i$  的二次型来间接评估燃油经济性, 即

$$J_F = w_{a_{i,des}} a_{i,des}^2 + w_{j_i} j_i^2 \quad (9)$$

式中,  $j_i = \dot{a}_{i,des}$ ,  $w_{a_{i,des}}$ 、 $w_{j_i}$  分别为  $a_{i,des}$  与  $j_i$  的权重系数。

#### (3) 驾乘舒适性。

良好驾乘体验间接评价方法<sup>[12]</sup>: 跟驰过程中车距误差  $\Delta d_i$  的收敛性;  $a_{i,des}$  与  $j_i$  于可容许控制集内的保持能力; 驾驶员主动干预后的响应能力。

由于部分性能指标已在式 (8)、式 (9) 中有体现, 故其二次型简化为

$$J_C = w_{c_i} (a_{i,ref} - a_i)^2 \quad (10)$$

式中,  $w_{c_i}$  为相应权重系数,  $a_{i,ref} = k_v \Delta v_i + k_d \Delta d_i$  为驾驶员参考加速度<sup>[16]</sup>,  $k_v$ 、 $k_d$  分别为相应权重系数。

### 2.2.2 跟驰安全性

跟驰安全性约束条件为

$$d_i \geq d_{i,safe} = \max\{\Delta v_i \cdot t_{TTC}, d_{cr}\} \quad (11)$$

式中,  $t_{TTC}$  为碰撞时间, 表示制动安全性<sup>[13]</sup>,  $d_i$  为实际车距,  $d_{i,safe}$  为安全跟车车距,  $d_{cr}$  为安全车距临界值.

### 2.2.3 车队稳定性

(1) 车间时距.

由上文分析结论知, 对于 CTH 策略而言, 车间时距约束如下

$$\tau_i \geq \tau_{cr} \quad (12)$$

式中,  $\tau_{cr}$  为车队临界稳定时所对应的车间时距.

(2) 车队规模.

当车队规模为 2 且满足式(11)时, 车队是稳定的. 当车队规模逐渐扩大时, 车队保持稳定的能力会下降, 故而约束如下

$$N \leq N_{cr} \quad (13)$$

式中,  $N_{cr}$  为车队临界稳定时的车队规模.

这里不考虑因邻道车辆并线而引入的外部扰动.

(3) 其他因素.

车辆跟驰过程中过于追求追踪性等性能指标, 抑或瞬态工况皆有可能使车队失稳<sup>[17]</sup>. 亦即, 不同跟随工况下, 需合理分配控制目标权重, 谨慎松弛约束空间的边界约束.

### 2.2.4 车队整体品质

CACC 巡航过程中, 通过车队响应时间、车距误差束波动幅度、工况适应能力等指标来间接评估车队整体品质.

## 2.3 多目标决策控制算法

### 2.3.1 代价函数及线性约束条件

为满足驾驶员跟驰过程中的期望响应, 基于 MPC 框架对多目标进行协调控制, 建立预测时域为  $[k, k+p-1]$  的代价函数

$$J = \sum (J_T + J_F + J_C) = X^T W X + U^T R U + C \quad (14)$$

式中,  $C$  为常数项,

$$W = \text{diag}(W_t, W_t, \dots, W_t) + \text{diag}(W_c, W_c, \dots, W_c)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & \cdots & 0 & 0 \\ r_2 & r_1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & r_1 & r_2 \\ 0 & 0 & \cdots & r_2 & r_1 \end{bmatrix}_{p \times p}$$

其中,

$$W_t = \text{diag}(w_{\Delta d_i}, w_{\Delta v_i}, 0)$$

$$W_c = w_{c_i} \begin{bmatrix} k_d^2 & k_d k_v & -k_d \\ k_d k_v & k_v^2 & -k_v \\ -k_d & -k_v & 1 \end{bmatrix}$$

$$r_1 = w_{a_{i,des}} + \frac{2w_{j_i}}{T_s^2}, \quad r_2 = -\frac{w_{j_i}}{T_s^2}$$

考虑到车辆自身物理限制等因素, 需要对控制器工作域进行边界约束<sup>[12]</sup>, 从而建立过程状态与系统 I/O 约束条件如下.

$$\begin{cases} u_{i,min} \leq u_i(k+j|k) \leq u_{i,max} \\ \Delta u_{i,min} \leq \Delta u_i(k+j|k) \leq \Delta u_{i,max} \\ y_{i,min} \leq y_i(k+j+1|k) \leq y_{i,max} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $j \in [0, p-1]$ ,  $u_{i,min}$ 、 $\Delta u_{i,min}$  分别为可容许控制与可容许增量控制下界,  $u_{i,max}$ 、 $\Delta u_{i,max}$  分别为可容许控制与可容许增量控制上界,  $y_{i,min} = [\Delta d_{i,min}, \Delta v_{i,min}, a_{i,min}]^T$  为系统输出下界,  $y_{i,max} = [\Delta d_{i,max}, \Delta v_{i,max}, a_{i,max}]^T$  为系统输出上界.

### 2.3.2 松弛向量约束管理

瞬态工况下, 硬约束条件易致滚动优化过程中无可行解问题, 故引入松弛向量对硬约束条件进行松弛化, 以扩展求解可行域<sup>[12-13]</sup>.

考虑到跟驰安全性与车队稳定性的硬性约束, 仅对式(15)进行松弛化处理, 即

$$\begin{cases} u_{i,min} + \varepsilon_{i,1} v_{i,min}^{u_i} \leq u_i(k+j|k) \leq u_{i,max} + \varepsilon_{i,1} v_{i,max}^{u_i} \\ \Delta u_{i,min} + \varepsilon_{i,2} v_{i,min}^{\Delta u_i} \leq \Delta u_i(k+j|k) \leq \Delta u_{i,max} + \varepsilon_{i,2} v_{i,max}^{\Delta u_i} \\ y_{i,min} + \varepsilon_{i,3} v_{i,min}^{y_i} \leq y_i(k+j+1|k) \leq y_{i,max} + \varepsilon_{i,3} v_{i,max}^{y_i} \end{cases} \quad (16)$$

式中, 松弛因子满足  $\varepsilon_{i,1} \geq 0$ 、 $\varepsilon_{i,2} \geq 0$ 、 $\varepsilon_{i,3} \geq 0$ , 松弛系数满足  $v_{i,min}^{u_i} \leq 0$ 、 $v_{i,min}^{\Delta u_i} \leq 0$ 、 $v_{i,min}^{y_i} \leq 0$ 、 $v_{i,max}^{u_i} \geq 0$ 、 $v_{i,max}^{\Delta u_i} \geq 0$ 、 $v_{i,max}^{y_i} \geq 0$ .

### 2.3.3 控制算法最终演变

为获得较好的控制品质, 采用增量式控制策略. 定义当前  $k$  时刻与  $k-1$  时刻的控制输入之差为控制增量, 即

$$\Delta u_i(k) = u_i(k) - u_i(k-1) \quad (17)$$

则在  $[k, k+p-1]$  预测时域内, 满足

$$U = K_1 u_i(k-1) + K_2 \Delta U \quad (18)$$

式中,  $\Delta U = [\Delta u_i(k), \Delta u_i(k+1), \dots, \Delta u_i(k+p-1)]^T$  为预测时域的控制增量序列, 各系数矩阵满足

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{p \times 1}, \quad K_2 = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ -1 & 1 & & \\ \vdots & \ddots & \ddots & \\ 1 & \cdots & -1 & 1 \end{bmatrix}_{p \times p}$$

此外, 求解过程中, 若松弛因子自动调节过大, 可能会使控制器工作域背离可容许范围, 从而使得边界约束作用失效. 换句话说, 此时约束最优化问题将退化成无约束最优化问题了, 其实际应用场景有限.

为抑制松弛因子对约束边界的无限松弛能

力,采用正则化方法,于代价函数中引入 L2 正则化项,使得闭环系统在约束最优化问题寻优可行性与约束边界松弛程度之间寻求平衡<sup>[7]</sup>.

所以,将式(14)改写成

$$J(y_i, u_i, \Delta u_i, \varepsilon_i) = J + \varepsilon_i^T \rho_i \varepsilon_i \quad (19)$$

式中,  $\varepsilon_i = [\varepsilon_{i,1}, \varepsilon_{i,2}, \varepsilon_{i,3}]^T$  为向量松弛因子,  $\rho_i = \text{diag}(\rho_{i,1}, \rho_{i,2}, \rho_{i,3})$  为惩罚系数矩阵,用以惩罚松弛因子扩展约束边界的松弛能力<sup>[7]</sup>.

再将式(7)、式(18)代入式(19)中,化简整理并忽略常数项得

$$J(y_i, u_i, \Delta u_i, \varepsilon_i) = \bar{U}^T H \bar{U} + 2f^T \bar{U} \quad (20)$$

式中,

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} \Delta U \\ \varepsilon_i \end{bmatrix}_{(p+3) \times 1}$$

$$H = \begin{bmatrix} K_2^T (B_p^T W B_p + R) K_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \rho_i \end{bmatrix}_{(p+3) \times (p+3)}$$

$$f = [x^T(k) A_p^T + \Phi^T G_p^T + e^T(k) M_p^T] W B_p K_2 + u_i(k-1) K_1^T (B_p^T W B_p + R) K_2, \mathbf{0}]^T$$

从而,在 MPC 模型预测控制框架下,综合协调驾驶员期望响应、跟驰安全性、车队稳定性等多个控制目标的 CACC 设计问题最终转化成带线性矩阵不等式约束的凸二次规划问题,即

$$\begin{cases} \min \{ \bar{U}^T H \bar{U} + 2f^T \bar{U} \} \\ \text{s.t. } \Omega \bar{U} \leq T \end{cases} \quad (21)$$

式中,

$$\Omega = \begin{bmatrix} K_2 & -v_{\max}^{u_i} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -K_2 & v_{\min}^{u_i} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ E & \mathbf{0} & -v_{\max}^{\Delta u_i} & \mathbf{0} \\ -E & \mathbf{0} & v_{\min}^{\Delta u_i} & \mathbf{0} \\ C_p B_p & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -V_{\max}^{y_i} \\ -C_p B_p & \mathbf{0} & \mathbf{0} & V_{\min}^{y_i} \\ -L_p C_p B_p & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}_{11p \times (p+3)}$$

$$T = \begin{bmatrix} U_{\max} - K_1 u_i(k-1) \\ -U_{\min} + K_1 u_i(k-1) \\ \Delta U_{\max} \\ -\Delta U_{\min} \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}_{11p \times 1}$$

其中,  $E = I_{p \times p}$

$$T_1 = Y_{\max} - C_p A_p x(k) - C_p G_p \Phi - C_p M_p e(k)$$

$$T_2 = -Y_{\min} + C_p A_p x(k) + C_p G_p \Phi + C_p M_p e(k)$$

$$T_3 = -D_{\text{safe}} + D_{\text{des}} + L_p C_p [A_p x(k) + G_p \Phi + M_p e(k)]$$

$$D_{\text{safe}} = [d_{i,\text{safe}}(k), d_{i,\text{safe}}(k), \dots, d_{i,\text{safe}}(k)]^T$$

$$D_{\text{des}} = [d_{i,\text{des}}(k), d_{i,\text{des}}(k), \dots, d_{i,\text{des}}(k)]^T$$

$$L_p = \text{diag}(l, l, \dots, l), l = [1, 0, 0]$$

$$v_{\max}^{u_i} = [v_{\max}^{u_i}, v_{\max}^{u_i}, \dots, v_{\max}^{u_i}]^T, v_{\min}^{u_i} = [v_{\min}^{u_i}, v_{\min}^{u_i}, \dots, v_{\min}^{u_i}]^T$$

$$v_{\max}^{\Delta u_i} = [v_{\max}^{\Delta u_i}, v_{\max}^{\Delta u_i}, \dots, v_{\max}^{\Delta u_i}]^T, v_{\min}^{\Delta u_i} = [v_{\min}^{\Delta u_i}, v_{\min}^{\Delta u_i}, \dots, v_{\min}^{\Delta u_i}]^T$$

$$V_{\max}^{y_i} = [v_{\max}^{y_i}, v_{\max}^{y_i}, \dots, v_{\max}^{y_i}]^T, V_{\min}^{y_i} = [v_{\min}^{y_i}, v_{\min}^{y_i}, \dots, v_{\min}^{y_i}]^T$$

$$v_{\max}^{y_i} = [v_{\max}^{\Delta d_i}, v_{\max}^{\Delta v_i}, v_{\max}^{a_i}]^T, v_{\min}^{y_i} = [v_{\min}^{\Delta d_i}, v_{\min}^{\Delta v_i}, v_{\min}^{a_i}]^T$$

在  $p$  步有限预测时域滚动优化求解过程中,当  $u_i, \Delta u_i, y_i$  未超出工作域约束边界时,松弛因子取值为 0; 而当其超出工作域约束边界时,相应松弛因子会自动正向增大以扩展控制器工作域,使得带约束的凸二次规划问题具有可行解.

在当前  $k$  采样周期内,通过式(21)进行优化求解,得到一串预测序列

$$\bar{U}^* = [\Delta u_i^*(k), \Delta u_i^*(k+1), \dots, \Delta u_i^*(k+p-1), \varepsilon_{i,1}, \varepsilon_{i,2}, \varepsilon_{i,3}]^T \quad (22)$$

选取上述预测序列中第一个分量  $\Delta u_i^*(k)$  作为实际控制增量,并引入饱和和处理函数,使得控制层最优输入更为合理,即

$$u_i^*(k) = \begin{cases} u_{\max}^*, (u_i(k-1) + \Delta u_i^*(k)) > u_{\max}^* \\ u_i(k-1) + \Delta u_i^*(k), \text{其他} \\ u_{\min}^*, (u_i(k-1) + \Delta u_i^*(k)) < u_{\min}^* \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $u_{\max}^*, u_{\min}^*$  分别为控制输入上限与下限.

下一采样时刻,预测时域向前移动一步,并重复上述过程,从而实现 CACC 滚动在线控制.

### 3 仿真验证

本文利用 Matlab/Simulink 搭建了多目标 CACC 期望车距控制模型、逆纵向动力学模型、车辆动力学模型,稳态舒缓工况下控制算法仿真参数见表 1,车辆动力学参数详见文献 [10].

约定车队规模为 11,领车编号为 0,跟随车辆编号依次为 1~10. 同质车队与异质车队的仿真参数分别见表 2 与表 3,其中,组号表示仿真对比组号,编号即为车辆编号.

典型仿真工况如下.

(1) 稳态舒缓工况.

领车初始速度为  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在  $t=10 \text{ s}$  至  $t=130 \text{ s}$

表 1 控制算法仿真参数

**Table 1** Parameters of the CACC platoon

$K_{i,L}$	$T_s$	$k_d$	$k_v$	$t_{TTC}$	$d_0$	$d_{cr}$	$p$
1.0	0.1	0.02	0.25	-3	5.0	5.0	5
$N_{cr}$	$\phi_0$	$\rho_i$	$w_{\Delta v_i}$	$w_{a_{i,des}}$	$w_{c_i}$	$y_{i,max}$	$y_{i,min}$
11	0.75	diag(3,3,3)	3.0	0.1	0.01	$[5.0, 1.0, 0.6]^T$	$[-5.0, -1.0, -0.6]^T$
$u_{i,max}$	$u_{i,min}$	$\Delta u_{i,max}$	$\Delta u_{i,min}$	$v_{max}^{y_i}$	$v_{min}^{y_i}$	$u_{max}^{u_i}$	$u_{min}^{u_i}$
0.6	-0.6	0.1	-0.1	$[3.0, 1.0, 0.1]^T$	$[-3.0, -1.0, -0.1]^T$	0.1	-0.1
$v_{max}^{\Delta u_i}$	$v_{min}^{\Delta u_i}$						
0.01	-0.01						

表 2 同质车队仿真参数

**Table 2** Parameters of the homogeneous platoon

Group No.	$T_{i,L}$	$T_{i,D}$	$\tau_i$
I	0.40	0	2.0
II	0.40	0	1.5
III	0.40	0	1.0
IV	0.40	0	0.5

表 3 异质车队仿真参数

**Table 3** Parameters of the heterogeneous platoon

Vehicle No.	$T_{i,L}$	$T_{i,D}$	$\tau_i$	
			Group I	Group II
1	0.40	0	1.5	1.5
2	0.40	0	1.5	1.5
3	0.36	0	1.2	1.2
4	0.36	0	1.2	1.2
5	0.60	0	2.0	1.0
6	0.60	0	2.0	1.0
7	0.55	0	1.8	1.1
8	0.55	0	1.8	1.1
9	0.40	0	1.0	0.5
10	0.40	0	1.0	0.5

时间段内, 领车保持加速度为 $\pm 0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的舒缓循环工况, 之后保持速度为 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的匀速状态。

(2) 瞬态急加速工况。

领车初始速度为 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 于 $t=10 \text{ s}$ 时以 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的加速度急加速至 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(3) 瞬态急减速工况

领车初始速度为 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 于 $t=10 \text{ s}$ 时以 $-2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的减速度急减速至 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

### 3.1 同质车队数字仿真

#### 3.1.1 稳态舒缓工况

图 4 表示在稳态舒缓工况下选取不同时距 $\tau_i$ 时 $\Delta d_i$ 的传播情况。随着时距 $\tau_i$ 取值减小, 车队总长

逐渐变短, 有益于改善道路通行能力; 而另一方面, 随着时距 $\tau_i$ 取值减小, 误差束波动幅度逐步变大, 即 $\Delta d_i$ 对时距 $\tau_i$ 的敏感度渐增。

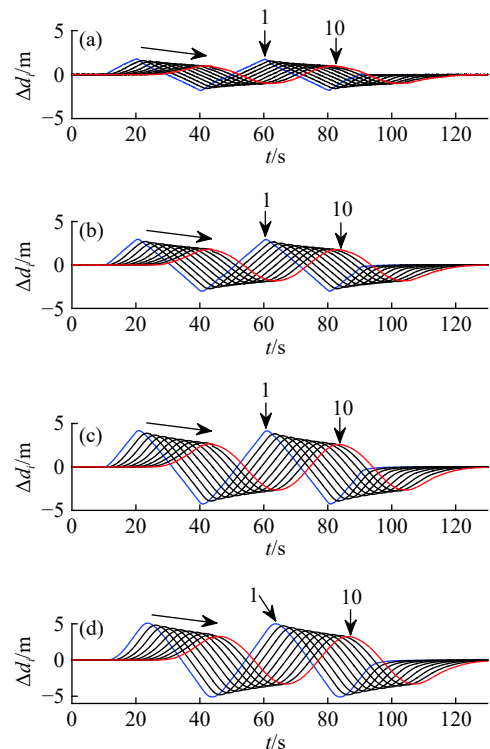


图 4 时距 $\tau_i$ 对同质车队响应的影响. (a)  $\tau_i=2.0 \text{ s}$ ; (b)  $\tau_i=1.5 \text{ s}$ ; (c)  $\tau_i=1.0 \text{ s}$ ; (d)  $\tau_i=0.5 \text{ s}$

Fig.4 Homogeneous platoon response with time gap  $\tau_i$ : (a)  $\tau_i=2.0 \text{ s}$ ; (b)  $\tau_i=1.5 \text{ s}$ ; (c)  $\tau_i=1.0 \text{ s}$ ; (d)  $\tau_i=0.5 \text{ s}$

图 5 表示在时距 $\tau_i=1.5 \text{ s}$ 的条件下, 选取不同权重 $w_{\Delta d_i}$ 时 $\Delta d_i$ 的传播情况。比较易发现, 随着目标权重 $w_{\Delta d_i}$ 增大,  $\Delta d_i$ 传播过程中发生发散现象, 表明车队行驶过程中过于追求追踪性能会影响车队稳定性。

图 6 亦表示在同样条件下, 选取不同权重 $w_{j_i}$ 时 $\Delta d_i$ 的传播情况。比较易发现, 随着权重 $w_{j_i}$ 取值增大, 误差束波动幅度渐增, 车队响应时间渐长, 表



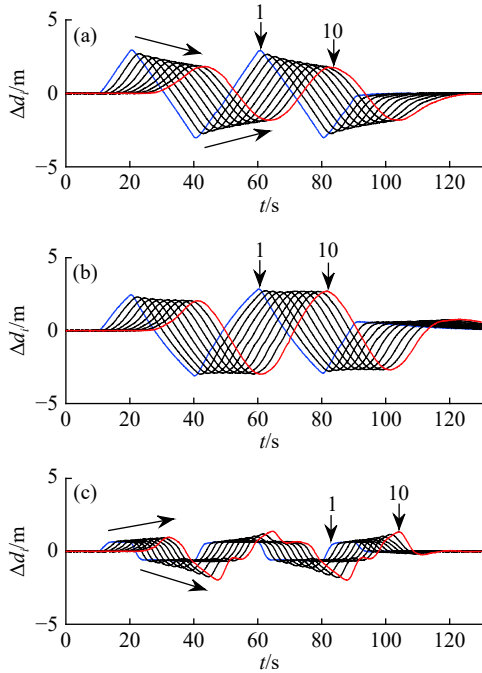


图 5 目标权重  $w_{\Delta d_i}$  对同质车队响应的影响. (a)  $w_{\Delta d_i} = 0.01$ ; (b)  $w_{\Delta d_i} = 0.1$ ; (c)  $w_{\Delta d_i} = 1.0$

Fig.5 Homogeneous platoon response with  $w_{\Delta d_i}$ : (a)  $w_{\Delta d_i} = 0.01$ ; (b)  $w_{\Delta d_i} = 0.1$ ; (c)  $w_{\Delta d_i} = 1.0$

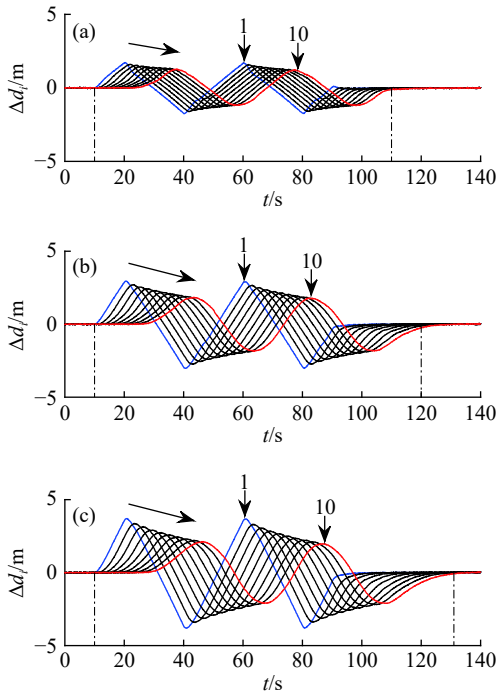


图 6 目标权重  $w_{j_i}$  对同质车队响应的影响. (a)  $w_{j_i} = 0.0006$ ; (b)  $w_{j_i} = 0.001$ ; (c)  $w_{j_i} = 0.0012$

Fig.6 Homogeneous platoon response with  $w_{j_i}$ : (a)  $w_{j_i} = 0.0006$ ; (b)  $w_{j_i} = 0.001$ ; (c)  $w_{j_i} = 0.0012$

明随着舒适性/经济性要求的提高,会带来误差束波动幅度增加、车队响应时间延长等额外开销.

### 3.1.2 瞬态急加速工况

图 7 表示在瞬态急加速工况下选取不同时距

$\tau_i$  时  $\Delta d_i$  的传播情况. 如图 7(a) 和 (b) 所示, 时距  $\tau_i$  选取 2.0 和 1.5 s 时, 车队皆能保持稳定, 且车距误差束波动幅度较小; 而时距  $\tau_i$  选取 1.5 s 时, 对于 CTH 车距策略来说, 期望车距相对较短, 即车队总长相对较短, 从而道路通行能力相对较好. 图 7(c) 中, 时距  $\tau_i$  选取 1.0 s 时,  $\Delta d_i$  约束能力略差. 图 7(d) 中, 时距  $\tau_i$  选取 0.5 s 时, 邻车间初始车距仅有 15 m, 滚动求解过程中  $\Delta d_i$  边界松弛过大, 追踪性能急剧下降, 后车为了使  $\Delta d_i$  收敛, 以超过前车车速进行追踪, 使得车速被放大传播 (见图 8), 且从第 7 辆车开始, 边界约束条件已严重背离, 从而导致车队失稳. 另一方面, 时距  $\tau_i$  选取 0.5 s 时, 若控制好车队规模, 亦有望维持车队稳定.

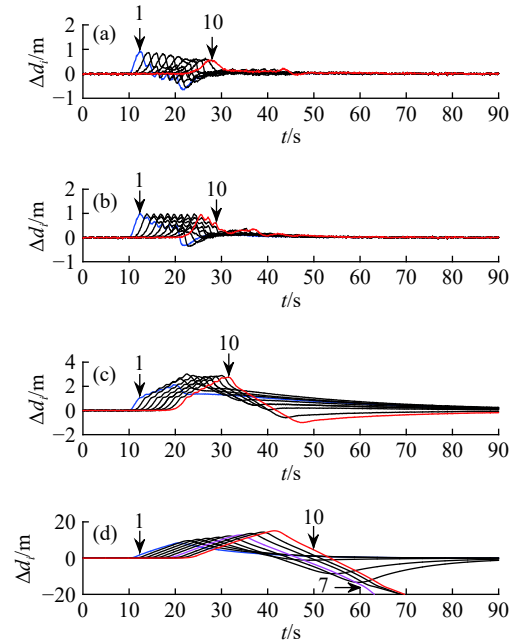


图 7 时距  $\tau_i$  对同质车队响应的影响. (a)  $\tau_i = 2.0$  s; (b)  $\tau_i = 1.5$  s; (c)  $\tau_i = 1.0$  s; (d)  $\tau_i = 0.5$  s

Fig.7 Homogeneous platoon response with time gap  $\tau_i$ : (a)  $\tau_i = 2.0$  s; (b)  $\tau_i = 1.5$  s; (c)  $\tau_i = 1.0$  s; (d)  $\tau_i = 0.5$  s

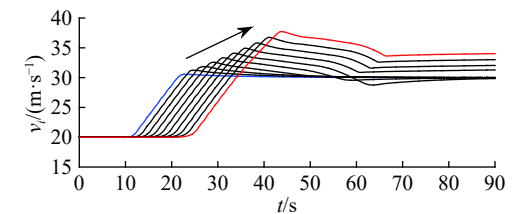


图 8 时距  $\tau_i = 0.5$  s 时同质车队速度传播情况

Fig.8 Propagation velocities of the homogeneous platoon when  $\tau_i = 0.5$  s

### 3.1.3 瞬态急减速工况

图 9 表示在瞬态急减速工况下选取不同时距  $\tau_i$  时  $\Delta d_i$  的传播情况. 如图 9(a) 与 9(b) 所示, 时距  $\tau_i$  选取 2.0 和 1.5 s 时, 车队皆能保持稳定, 且车距

误差束波动幅度较小. 图 9(c) 中, 时距选取 1.0 s 时,  $\Delta d_i$  负向约束能力稍差. 图 9(d) 中, 时距  $\tau_i$  选取 0.5 s 时, 邻车间初始车距仅有 15 m,  $\Delta d_i$  负向边界松弛过大, 降低了跟驰安全性, 最终导致整个车队失稳.

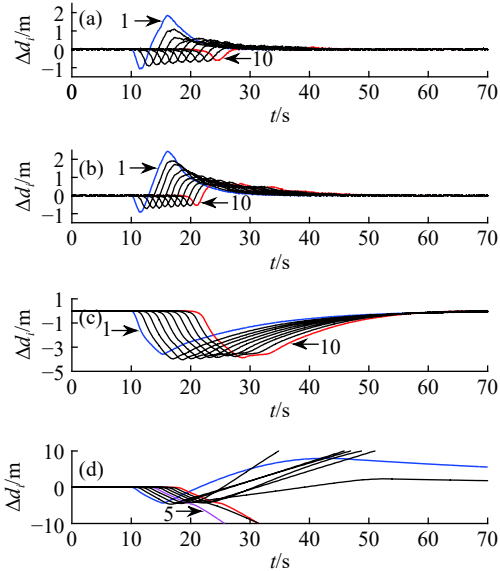


图 9 时距  $\tau_i$  对同质车队响应的影响. (a)  $\tau_i=2.0$  s; (b)  $\tau_i=1.5$  s; (c)  $\tau_i=1.0$  s; (d)  $\tau_i=0.5$  s

Fig.9 Homogeneous platoon response with time gap  $\tau_i$ : (a)  $\tau_i=2.0$  s; (b)  $\tau_i=1.5$  s; (c)  $\tau_i=1.0$  s; (d)  $\tau_i=0.5$  s

此外, 仿真过程中发现, 相对稳态舒缓工况而言, 瞬态工况下车队稳定性对目标权重  $w_{\Delta d_i}$ 、 $w_{j_i}$  较为敏感.

### 3.2 异质车队数字仿真

#### 3.2.1 稳态舒缓工况

对于异质车队, 跟随车辆的执行系时滞、车距策略的时距预设值不完全相同. 与组 I 相比, 组 II 中部分时距预设值相对偏小, 即邻车车距相对偏小.

图 10 表示在稳态工况下两组异质车队  $\Delta d_i$  的传播情况. 不难发现, 与组 I 相比, 组 II 车距误差束波动幅度稍大, 是由于时距预设偏小而致, 不过误差束波动幅度皆在可容许范围内, 两组车队皆能维持稳定.

#### 3.2.2 瞬态急加速工况

图 11 与图 12 表示在急加速工况下两组异质车队车距误差与车速的传播情况. 与组 I 相比, 组 II 车距误差束波动幅度较大, 车队追踪性能较差, 从而导致该组车队维持稳定时的响应时间较长.

#### 3.2.3 瞬态急减速工况

图 13 与图 14 表示在急减速工况下两组异质

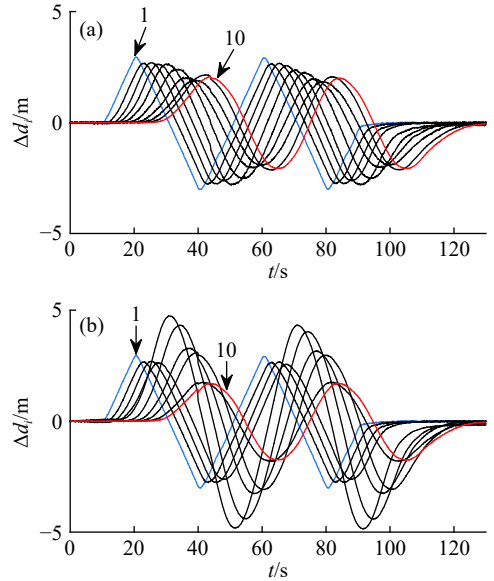


图 10 异质车队车距误差传播情况. (a) 组 I; (b) 组 II

Fig.10 Propagation spacing errors of the heterogeneous platoon: (a) group I; (b) group II

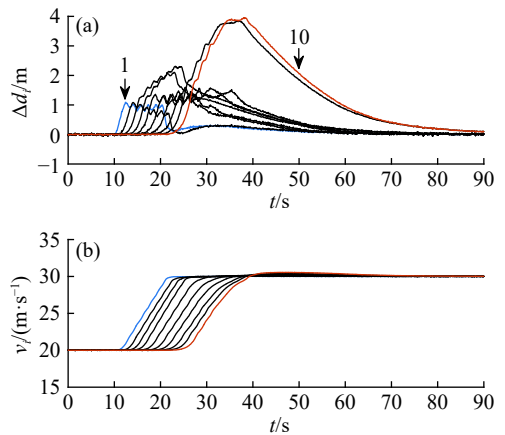


图 11 在组 I 时距  $\tau_i$  下异质车队响应. (a) 车距误差; (b) 车速

Fig.11 Heterogeneous platoon response for group I with the preset time gap: (a) spacing error; (b) velocity

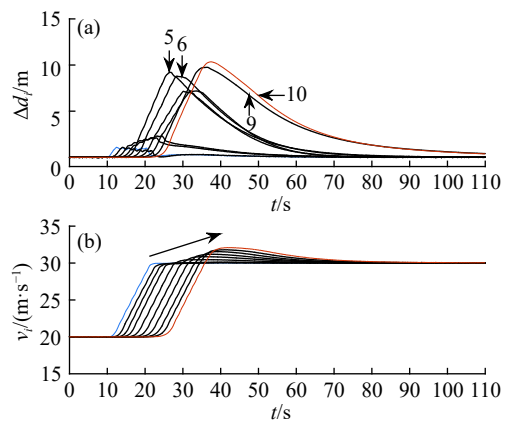


图 12 在组 II 时距  $\tau_i$  下异质车队响应. (a) 车距误差; (b) 车速

Fig.12 Heterogeneous platoon response for group II with the preset time gap: (a) spacing error; (b) velocity

车队车距误差与实际车距的传播情况. 与组 I 相比, 组 II 车距误差束负向波动幅度较大, 且第 9 与第 10 辆车由于初始预设时距较小, 从而在紧急制动过程中实际跟车距离较近 (见图 14(b)), 降低了跟驰安全性.

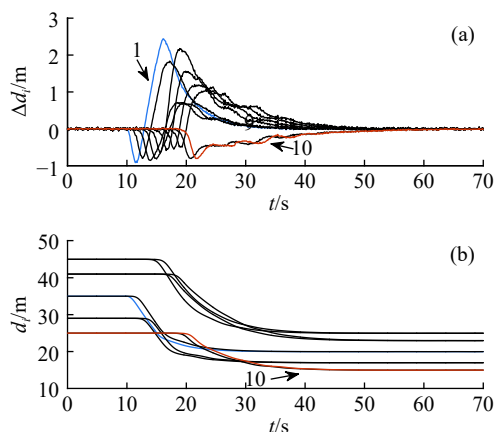


图 13 在组 I 时距  $\tau_i$  下异质车队响应. (a) 车距误差; (b) 实际车距

Fig.13 Heterogeneous platoon response for group I with the preset time gap: (a) spacing error; (b) actual spacing

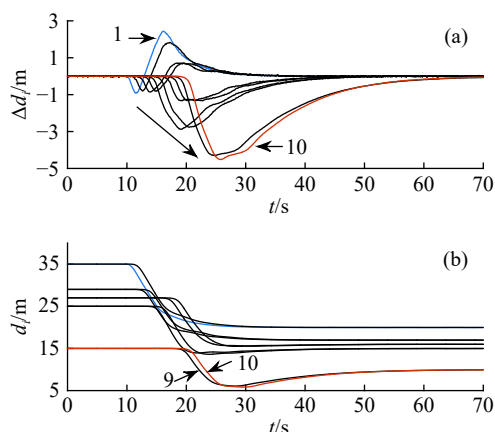


图 14 在组 II 时距  $\tau_i$  下异质车队响应. (a) 车距误差; (b) 实际车距

Fig.14 Heterogeneous platoon response for group II with the preset time gap: (a) spacing error; (b) actual spacing

## 4 结论

(1) 相比单车 ACC 而言, 协同 ACC 的约束空间更为严苛.

(2) 基于 MPC 框架, 综合协调驾驶员期望响应、跟驰安全性、车队稳定性、车队整体品质等控制目标, 采用加权二次型性能泛函以及线性矩阵不等式约束的形式, 将协同 ACC 设计问题最终转化成带约束的在线凸二次规划问题. 同时引入松弛向量约束管理法以及抑制松弛因子作用的正则化项, 使得闭环系统在约束最优化问题寻优可行性与约束边界松弛程度之间寻求平衡.

(3) 仿真结果表明, 车队行驶过程中过于追求追踪性等性能指标会影响到整个车队的稳定性; 舒适性与经济性要求的提高, 将带来车队响应时间开销以及误差束波动幅度的增加; 时距取值增大使得误差束波动幅度减小, 但也将导致道路通行能力下降; 相对稳态舒缓工况而言, 瞬态工况下车队稳定性对时距与控制目标权重较为敏感, 为提高车队对瞬态工况的适应能力以及车队整体品质, 建议在跟驰安全性、车队稳定性良好的前提下寻求一定的舒适性与经济性.

## 参考文献

- [1] Xiao L Y, Gao F. Practical string stability of platoon of adaptive cruise control vehicles. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2011, 12(4): 1184
- [2] Kayacan E. Multiobjective  $H_\infty$  control for string stability of cooperative adaptive cruise control systems. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2017, 2(1): 52
- [3] Filho C M, Terra M H, Wolf D F. Safe optimization of highway traffic with robust model predictive control-based cooperative adaptive cruise control. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2017, 18(11): 3193
- [4] Fernandes P, Nunes U. Multiplatooning leaders positioning and cooperative behavior algorithms of communicant automated vehicles for high traffic capacity. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2015, 16(3): 1172
- [5] Swaroop D, Rajagopal K R. A review of constant time headway policy for automatic vehicle following // 2001 *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*. Oakland, 2001: 65
- [6] Wu G Q, Zhang L X, Liu Z Y, et al. Research status and development trend of vehicle adaptive cruise control systems. *J Tongji Univ Nat Sci*, 2017, 45(4): 544  
(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. 同济大学学报: 自然科学版, 2017, 45(4): 544)
- [7] Zhang J H, Li Q, Chen D P. Drivers imitated multi-objective adaptive cruise control algorithm. *Control Theory Appl*, 2018, 35(6): 769  
(章军辉, 李庆, 陈大鹏. 仿驾驶员多目标决策自适应巡航鲁棒控制. *控制理论与应用*, 2018, 35(6): 769)
- [8] Zhao J, Masahiro O, Wang T, et al. Impacts of the ACC system on highway traffic safety and capacity. *China Mech Eng*, 2007, 18(12): 1496  
(赵津, 大屋勝敬, 王婷, 等. 自适应巡航系统对高速公路交通安全及流量的影响. *中国机械工程*, 2007, 18(12): 1496)
- [9] Bifulco G N, Pariota L, Simonelli F, et al. Development and testing of a fully adaptive cruise control system. *Transp Res Part C Emerg Technol*, 2013, 29: 156
- [10] Zhang J H, Li Q, Chen D P. Integrated adaptive cruise control with

- weight coefficient self-tuning strategy. *Appl Sci*, 2018, 8(6): 978
- [11] Milanés V, Shladover S E, Spring J, et al. Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2014, 15(1): 296
- [12] Zhang J H, Li Q, Chen D P. Multi-objective adaptive cruise control with multi-mode strategy. *J Univ Electron Sci Technol China*, 2018, 47(3): 368  
(章军辉, 李庆, 陈大鹏. 车辆多模式多目标自适应巡航控制. *电子科技大学学报*, 2018, 47(3): 368)
- [13] Li S B, Li K Q, Rajamani R, et al. Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2011, 19(3): 556
- [14] Bageshwar V L, Garrard W L, Rajamani R. Model predictive control of transitional maneuvers for adaptive cruise control vehicles. *IEEE Trans Veh Technol*, 2004, 53(5): 1573
- [15] Zhang J, Ioannou P A. Longitudinal control of heavy trucks in mixed traffic: Environmental and fuel economy considerations. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2006, 7(1): 92
- [16] Boer E, Nicholas W, Michael M, et al. Driver-model based assessment of behavioral adaptation. *Trans Soc Autom Eng Japan*, 2006, 37(4): 21
- [17] Zhang J H, Li Q, Chen D P. Vehicle-to-vehicle based multi-objective coordinated adaptive cruise control considering platoon stability. *Adv Mech Eng*, 2018, 10(10): 1