

# 时滞条件下商用车队分布式MPC多目标优化控制\*

杨瑞新<sup>1</sup>, 蔡英凤<sup>1</sup>, 廉玉波<sup>2</sup>, 陈龙<sup>1</sup>, 孙晓强<sup>1</sup>

(1. 江苏大学汽车工程研究院, 镇江 212013; 2. 比亚迪汽车工业有限公司汽车工程研究院, 深圳 518118)

**[摘要]** 商用车队巡航控制是提高运输效率的有效方法,但现有研究多基于单一跟车优化目标的匀质队列控制,同时使用简单的架构应对通信时间延迟,在实际场景中不具有普适性。为此,本文基于异质电动商用车队,提出了一种分布式模型预测控制策略,实现兼顾车辆跟随性、经济性和舒适性等特性需求的多目标控制;并通过设计针对时延预测模型的时延缓冲器和补偿器,有效解决了非理想通信条件下跟车距离误差过大的问题。通过Matlab/Simulink仿真结果表明,所提控制算法能够实现异质商用车队列的多目标优化控制,与传统模型预测控制(MPC)相比,大幅减小跟车距离误差、能耗和加加速度,有效改善队列的跟随性、经济性和舒适性,显著降低时间延迟的不利影响。

**关键词:** 异质商用车队; 分布式模型预测控制; 多目标优化; 通信延迟

## Distributed MPC Multi-objective Optimization Control for Commercial Vehicle Platoon Under Time Delay Conditions

Yang Ruixin<sup>1</sup>, Cai Yingfeng<sup>1</sup>, Lian Yubo<sup>2</sup>, Chen Long<sup>1</sup> & Sun Xiaoqiang<sup>1</sup>

1. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013;

2. Automotive Engineering Research Institute, BYD Automotive Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118

**[Abstract]** Commercial platoon cruise control is an effective method to improve transportation efficiency, but existing research is mostly based on homogeneous platoon control with one single vehicle following optimization objective, while using a simple architecture to cope with communication time delay, which is not universally applicable in practical scenarios. Therefore, based on heterogeneous electric commercial vehicle fleets, in this paper a distributed model predictive control strategy is proposed to achieve multi-objective control that takes into account of requirements of vehicle following, economy, and comfort. Delay buffers and compensators are designed for delay prediction models, effectively solving the problems of excessive tracking distance error caused by non-ideal communication conditions. Matlab/Simulink simulation shows that the proposed control algorithm can achieve multi-objective optimization control of heterogeneous commercial vehicle fleets. Compared with traditional model predictive control (MPC), it significantly reduces the tracking distance error, energy consumption, and jerk, effectively improving performance of the platoon in terms of tracking, economy and comfort and significantly reducing the adverse effect of time delay.

**Keywords:** heterogeneous commercial vehicle platoon; distributed model predictive control; multi-objective optimization; communication delay

\* 国家自然科学基金(52225212, 52272418, U22A20100)和国家重点研发计划项目(2022YFB2503302)资助。

原稿收到日期为2024年07月18日,修改稿收到日期为2024年08月30日。

通信作者:蔡英凤,教授,博士生导师,E-mail: caicaixiao0304@126.com。

## 前言

公路货运一直是世界经济发展的基础,货运需求呈逐年增长的趋势。然而,随着公路交通流量显著增加,拥堵问题日益严重,交通通行效率低,单车能耗高。多车队列控制是一种典型的协同运动控制,队列中的车辆可以根据周围车辆的状态信息自动调整其运动状态,并通过速度控制实现预期的任何编队构型<sup>[1]</sup>。针对车辆编队的控制,国内外学者先后进行了车辆定速巡航(CC)、自适应巡航(ACC)、协同自适应巡航(CACC)等车辆巡航方式相关的研究工作<sup>[2-4]</sup>,大多考虑了道路上各车之间的相关性,从而完成车辆行驶过程中的控制,为商用车安全性、舒适性和经济性的提升做出了重大贡献<sup>[5]</sup>。但是,上述研究都基于匀质队列,这种情况在实际场景中并不常见,即便是同种车型的商用车之间也可能会因为货箱的载质量不同,而导致整车质量产生差异,从而造成队列运行中易产生不稳定因素。随着先进控制理论的演变与车队在物流行业的运用不断增加,编队运行的多目标控制问题日益突出,控制算法应兼顾跟随性、经济性、舒适性等多项综合性能。另外,当商用车数量增加时,会导致时延增加<sup>[6-7]</sup>,闭环动力学的稳定裕度减小<sup>[7-8]</sup>。具有时延的非理想通信对车辆队列控制的性能有重大影响,特别是在大规模队列系统中。因此,探索非理想通信条件下的CACC控制方法具有重要意义。目前已经有一些研究关注非理想通信的影响<sup>[8-9]</sup>,或者旨在增加对丢包和通信延迟的鲁棒性<sup>[10]</sup>,但在处理延迟时所用的方法较为保守。

目前针对商用车协同自适应巡航系统控制方法的研究有以下几种:PID控制、LQR控制和MPC控制等。王志文等<sup>[11]</sup>使用PID控制方法,建立使车队系统燃油消耗量尽可能低的控制器,通过对车辆之间的距离加以约束,从而减小编队系统在行驶过程中的系统误差,但结果显示,此系统抖动较大,除了能实现车辆队列系统跟随以外,难以满足舒适性等要求。PID控制的优点是算法简单,相对而言发展比较成熟,但是在面临相对比较复杂的变化系统时,PID控制器的应用会导致控制效果不理想的问题。张亮修等<sup>[12]</sup>基于一般LQR理论,向系统中引入向量松弛因子与反馈校正因子,借此提高CACC系统中各车的综合性能,通过实验验证发现,在优化了线性二次型算法之后,队列的鲁棒性得以增强,但是该研

究中的队列在车速较低的场景下,无法保证各车之间的安全跟车距离以及系统的安全性。Shi等<sup>[13]</sup>将车辆编队的分布模型视作耦合队列,通过模型预测控制算法,设计了新的分布式MPC控制方法,将车队中各车之间的耦合视为外界的干扰,从而增强系统的鲁棒性,然而,总体计算量较大,导致编队系统产生较大的延迟,在实际中难以实现。分布式模型预测控制能满足非线性复杂系统的需求,对于车辆编队控制来说,使用DMPC控制算法具有更高的安全性、稳定控制、对于复杂工况适应性好等优点。因此对于商用车编队行驶采用分布式模型预测控制具有重要的研究价值。

对于异质队列的控制,世界各地的学者在不同领域对多车队列系统地做出研究,如队列系统异质动力学特征<sup>[14]</sup>,固定或可变的车间距策略<sup>[15-16]</sup>,车间交互信息流拓扑<sup>[17]</sup>等。Gao等<sup>[18]</sup>提出了一种分布式自适应滑模控制方案以处理模型参数的不确定性。Pan等<sup>[19]</sup>研究了车辆执行器故障、道路坡度和侧向风等干扰对多车队列的影响,并提出了一种鲁棒自适应滑模控制方法,确保队列系统的队列稳定。Tyler等<sup>[20]</sup>提出通过形成一个合作模型预测控制来实现自动化策略,考虑了前后车辆的相互作用,以促进车队在道路干扰、速度瞬变和发动机限制下的协调,并通过减少不必要的发动机工作来进一步提高能源经济性。然而,上述研究仅改善了异质队列稳定性或经济性等单方面的控制效果,并没有兼顾到跟随性、经济性和舒适性等多项队列性能。

通讯时间延迟对车辆动力学稳定性和编队弦稳定性均具有不可忽视的影响,现在常见的延迟处理方法分为基于补偿控制器和基于信息重构的延迟补偿方法。其中,基于控制器的方法主要包括模型预测控制器(MPC), $H_\infty$ 鲁棒控制器以及神经网络控制器,而基于信息重构的延迟补偿方法则主要解决通讯延迟问题。Zhang等<sup>[21]</sup>利用空间维度代替时间维度,消除了通讯延迟对控制器稳定性的影响。Xu等<sup>[22-23]</sup>采用鲁棒控制器降低了通讯延迟对编队弦稳定性的影响。Yu等<sup>[24]</sup>利用Lyapunov-Krasovskii方法保证了在时变通讯延迟环境下车辆编队的弦稳定性。Tian等<sup>[25]</sup>利用长短期神经网络重构他车信息,实现了通讯延迟补偿。但上述研究均针对系统动力学参数相同的同构车辆编队,且大多使用线性控制器,这在复杂的非线性系统中的应用有限。

总体而言,许多研究只解决了CACC系统的一个特定特性(队列稳定性、经济性或安全性),而且大

多数研究没有充分解决异质队列间的通信延迟问题,不能适用于实际非线性队列的通信环境。因此,本文的主要贡献如下:

(1)针对纯电动异质商用车,为队列中的车辆设计了具有跟随性、经济性和舒适性等多目标函数的分布式非线性模型预测控制算法;

(2)利用模拟退火和粒子群优化算法在预测范围内求解,解决离散状态的非线性问题;

(3)在控制器上集成缓冲器和延迟补偿器,改善在延迟条件下异质商用车队列协同式自适应巡航控制情况,以实现非理想通信条件下的稳定控制。

## 1 系统建模

### 1.1 商用车队纵向动力学模型

商用车在前进过程中的受力情况如图1所示,加速度可以写成驱动功率、制动力和阻力的方程。根据牛顿第二定律,加速度 $a_i(t)$ 、驱动力 $F_{i,T}(t)$ 和阻力 $F_{i,r}(t)$ 之间的关系可以表示为

$$a_i(t) = \frac{1}{m_i} (F_{i,T}(t) - F_{i,r}(t)) \quad (1)$$

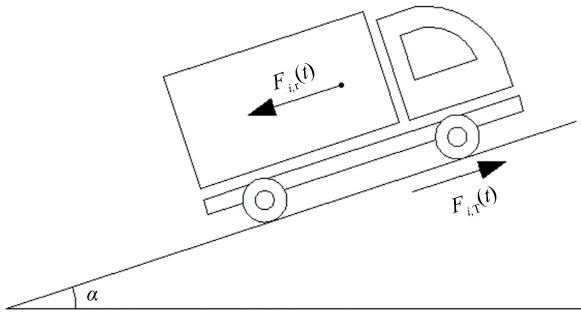


图1 商用车纵向运动受力图

考虑每辆商用车的驱动形式均为轮毂电机驱动,由于仅研究纵向运动,假设每个电机提供相同的转矩。由于驱动力 $F_{i,T}(t) = \frac{4T_i(t)i_g\eta_{m,i}}{r_{w,i}}$ ,式(1)改写为

$$a_i(t) = \frac{1}{m_i} \left( \frac{4T_i(t)i_g\eta_{m,i}}{r_{w,i}} - F_{i,r}(t) \right) \quad (2)$$

式中: $m_i$ 为第 $i$ 辆车的质量; $r_{w,i}$ 为第 $i$ 辆车的车轮滚动半径; $T_i(t)$ 为第 $i$ 辆车的电机输出转矩; $i_g$ 为减速器速比; $\eta_{m,i}$ 为第 $i$ 辆车的传动系机械效率;阻力 $F_{i,r}(t)$ 由滚动阻力、风阻和坡道阻力组成,可表示为

$$F_{i,r}(t) = fm_i g \cos \alpha + \frac{C_{d,i}\rho A_i v_i^2(t)}{2} + m_i g \sin \alpha \quad (3)$$

式中: $g$ 和 $f$ 是分别重力加速度和滚动系数; $\alpha$ 是车辆所处坡度; $C_{d,i}$ 是第 $i$ 辆车的空气阻力系数; $\rho$ 是空气密度; $A_i$ 第 $i$ 辆车的迎风面面积。

令系统状态变量为车辆位移、车速和电机输出转矩,即 $\mathbf{x}_i(t) = [S_i(t), v_i(t), T_i(t)]^T$ ,控制量为车辆电机转矩,即 $u_i(t) = T_i(t)$ ,状态方程为

$$\begin{cases} \dot{S}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = \frac{1}{m_i} \left( \frac{4T_i(t)i_g\eta_{m,i}}{r_{w,i}} - fm_i g \cos \alpha - \frac{C_{d,i}\rho A_i v_i^2(t)}{2} - m_i g \sin \alpha \right), i \in \{1, 2, \dots, N\} \\ \tau_i \dot{T}_i(t) + T_i(t) = e_i(t) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)可改写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i = f(\mathbf{x}_i(t), u_i(t)) \\ \mathbf{y}_i = \mathbf{c}_i \mathbf{x}_i \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{其中 } \mathbf{c}_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

式中: $i$ 为每辆车对应编号; $S_i(t)$ 为第 $i$ 辆车的位移; $v_i(t)$ 为第 $i$ 辆车的速度; $T_i(t)$ 为第 $i$ 辆车的电机实际力矩; $e_i(t)$ 为第 $i$ 辆车的电机期望转矩; $\tau_i$ 为第 $i$ 辆车动力系统的时滞参数。

由此可得离散化的动力学方程,其中 $\Delta t$ 为每一步计算的时间步长。

$$\begin{cases} S_i(t+1) = S_i(t) + v_i(t) \Delta t \\ v_i(t+1) = v_i(t) + \frac{1}{m_i} \left( \frac{4T_i(t)i_g\eta_{m,i}}{r_{w,i}} - fm_i g \cos \alpha - \frac{C_{d,i}\rho A_i v_i^2(t)}{2} - m_i g \sin \alpha \right) \Delta t, i \in N \\ T_i(t+1) = T_i(t) + \frac{1}{\tau_i} e_i(t) \Delta t - \frac{1}{\tau_i} T_i(t) \Delta t \end{cases} \quad (6)$$

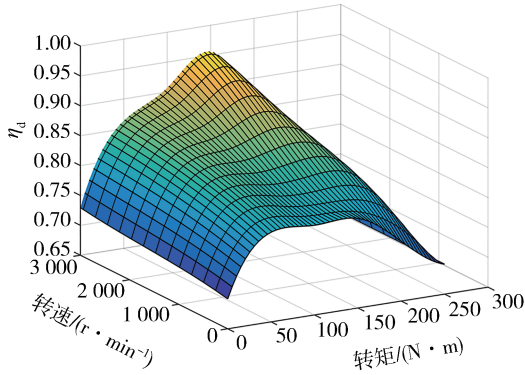
### 1.2 电机能耗模型

为计算商用车队列的能耗,须建立商用车电机能耗模型,以便后续验证队列经济性优化效果。电机功率的计算公式如式(7)所示<sup>[26]</sup>。

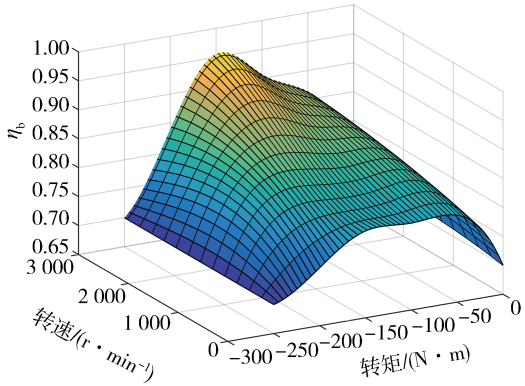
$$P_i(klt) = \begin{cases} \frac{4T_i(klt)v_i(klt)i_g}{r_{w,i}\eta_d}, & T_i(klt) \geq 0 \\ \frac{4T_i(klt)v_i(klt)i_g}{r_{w,i}}\eta_b, & T_i(klt) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\eta_d$ 为电机驱动效率; $\eta_b$ 为电机制动效率。本文采用的商用车电机效率MAP如图2所示。

根据文献[27],纯电动汽车的电机功率为



(a) 驱动效率MAP图



(b) 制动效率MAP图

图2 电机效率MAP图

$$P_i(klt) = \{ m_i a_i(t) + m_i g \cos \alpha C_r [c_1 v_i(klt) + c_2] + C_A v_i^2(klt) + m_i g \sin \alpha \} v_i(klt) \quad (8)$$

式中  $C_r$ 、 $c_1$  和  $c_2$  是滚动阻力参数。则瞬时能量消耗为

$$E_i(klt) = \frac{1}{\eta_e} P_i(klt) = \frac{1}{\eta_e} \{ m_i a_i(klt) v_i(klt) + m_i g \cos \alpha C_r [c_1 v_i^2(klt) + c_2 v_i(klt)] + C_A v_i^3(klt) + m_i g v_i(klt) \sin \alpha \} \quad (9)$$

式中  $\eta_e$  为电机效率、传动系统效率和其他能量损失的组合。

## 2 分布式MPC控制系统设计

### 2.1 分布式MPC控制系统设计

前车-领航车跟随式通信拓扑(PLF)结构中的跟随车接收从领航车辆和前方车辆传输的信息,具有良好的队列稳定性。本文CACC系统基于PLF结构设计了分布式模型预测控制器。根据商用车队纵向动力学建模,为异构车队中的每辆车定义了一个子预测优化问题,并使用通信拓扑结构传输的信

息来优化解决方案,以获得车辆的控制输入。

令  $N_p$  为DMPC的预测时域长度,定义如下3种类型的变量。

(1)系统预测变量

$s_i^p(nlt)$ :第*i*辆车在*t+n*时刻的预测位置

$v_i^p(nlt)$ :第*i*辆车在*t+n*时刻的预测速度

$a_i^p(nlt)$ :第*i*辆车在*t+n*时刻的预测加速度

$u_i^p(nlt)$ :第*i*辆车在*t+n*时刻的预测控制输入

$y_i^p(nlt)$ :第*i*辆车在*t+n*时刻的预测控制输出

(2)最优变量

$u_i^*(nlt)$ :第*i*辆车在*t+n*时刻的最优控制输入

(3)假设变量

$s_i^a(nlt)$ :第*i*辆车在*t+n*时刻的假设位置

$v_i^a(nlt)$ :第*i*辆车在*t+n*时刻的假设速度

$a_i^a(nlt)$ :第*i*辆车在*t+n*时刻的假设加速度

$u_i^a(nlt)$ :第*i*辆车在*t+n*时刻的假设控制输入

$y_i^a(nlt)$ :第*i*辆车在*t+n*时刻的假设控制输出

以下建立队列中车辆*i*的代价函数。

(1)跟车误差代价函数

首先,建立跟随车中的第*i*辆车( $i=2,3,4,\dots,N$ )与领航车( $i=1$ )的跟车误差代价函数。令系统输出为  $\mathbf{y}_i^p = [S_i^p, v_i^p, T_i^p]^T$ ,第*j*辆车的车身长度为  $l_j$  ( $j=1,2,\dots,N$ ),则与领航车的期望状态为

$$\mathbf{y}_{i,\text{des}} = \left[ S_1^a - (i-1)d - \sum_{j=1}^{i-1} l_j, v_1^a, T_1^a \right]^T, \text{跟车误差代价函数为}$$

$$J_{1,i}(klt) = \|\mathbf{A}_i(\mathbf{y}_{i,\text{des}}(klt) - \mathbf{y}_i^p(klt))\|_2 \quad (10)$$

式中  $\mathbf{A}_i$  为第*i*辆车与领航车的误差权重系数矩阵。

其次,建立跟随车中的第*i*辆车( $i=2,3,4,\dots,N$ )与前车的跟车误差代价函数。类似地定义与前车的期望状态为  $\mathbf{y}_{i-1,\text{des}} = [S_{i-1}^a - d - l_{i-1}, v_{i-1}^a, T_{i-1}^a]^T$ ,则跟车误差代价函数为

$$J_{2,i}(klt) = \|\mathbf{B}_i(\mathbf{y}_{i-1,\text{des}}(klt) - \mathbf{y}_i^p(klt))\|_2 \quad (11)$$

式中  $\mathbf{B}_i$  为第*i*辆车与前车的误差权重系数矩阵;  $S_{i-1}^a(klt)$  为前车于时刻*t*的位置;  $v_{i-1}^a(klt)$  为前车于时刻*t*的速度。

(2)经济性代价函数

$$J_{3,i}(klt) = \|\mathbf{C}_i \mathbf{P}_i(klt) \cdot \Delta t\|_2 \quad (12)$$

式中  $\mathbf{C}_i$  为第*i*辆车的能耗权重系数矩阵;  $\mathbf{P}_i(klt)$  为第*i*辆车的电机功率。

(3)舒适性代价函数

通过控制转矩变化率处于较小的水平,来确保

队列中各车在行驶时的舒适性。因此,车辆舒适性代价函数为

$$J_{4,i}(klt) = \|D_i(u_i^p(klt) - u_i(v_i^p(klt)))\|_2 \quad (13)$$

式中: $D_i$ 为第*i*辆车的舒适性权重系数矩阵; $u_i(v_i^p(klt))$ 为车辆在 $v_i^p(klt)$ 车速下匀速行驶的车辆转矩,如式(14)所示。

$$u_i(v_i^p(N_p|t)) = \frac{r_{w,i}}{4\eta_{m,i}} \left( \frac{1}{2} C_{d,i} A_i \rho v_i^p(N_p|t) \right)^2 + fm_i g \cos \alpha + m_i g \sin \alpha \quad (14)$$

由式(10)~式(13)可将编队协同DMPC控制器问题描述如下:

$$\begin{aligned} u_i^*(t) = \arg \min J_i(t) &= \sum_{k=0}^{N_p-1} (J_{1,i}(klt) + \\ & J_{2,i}(klt) + J_{3,i}(klt) + J_{4,i}(klt)) \quad (15a) \\ \left\{ \begin{aligned} (x_i^p(klt), u_i^p(klt)) &\in X_i \times U_i \quad (15b) \\ x_i^p(0t) &= x_i^p(t) \quad (15c) \\ x_i^p(Nt) &\in X_{i,T}, k=0, 1, \dots, N \quad (15d) \end{aligned} \right. \\ \text{s. t. } \left\{ \begin{aligned} S_i^p(N_p|t) &= S_i^p(N_p|t) - (i-1)d_{des} - \sum_{j=1}^{i-1} l_j \quad (15e) \\ V_{i,i}(x_i^p|u_i^p(k)) &\leq \phi(x_i^p(k), \alpha) \quad (15f) \\ |x_{i,1}^p(klt)|_{\infty, \delta} &\leq \theta_i \max_{l \in \{0, \dots, t\}} |x_{i-1,1}^p(klt)|_{\infty, \delta} \quad (15g) \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

式中:控制约束集 $U_i = [u_{i,\min}, u_{i,\max}]$ ;状态约束集 $X_i = [x_{i,\min}, x_{i,\max}]$ ;弦稳定因子 $0 < \theta_i < 1$ ;  $u_i^*(t) = \{u_i^*(0t), u_i^*(1t), \dots, u_i^*(Nt)\}$ 表示式(15)问题的最优解; $x_i(t)$ 表示在*t*时刻的当前状态。式(15d)表示终端约束,其中 $X_{i,T} \subset X_{i,0} \in X_{i,T}$ ;式(15f)是由车辆跟踪标准建立的稳定性约束;式(15g)是为了确保车辆队列系统的弦稳定性<sup>[28]</sup>。

为推导跟踪稳定性约束(式15(f)),考虑传统的汽车跟踪目标函数<sup>[28]</sup>:

$$V_{i,i}(x_i^p(t), u_i^p(t)) = \sum_{j=0}^{N-1} [\|x_i^p(jt)\|_{Q_i}^2 + \|u_i^p(jt)\|_{R_i}^2 + \|x_i^p(jt) - \hat{x}_i^p(jt)\|_{G_i}^2] + \|x_i^p(Nt)\|_{P_i}^2 \quad (16)$$

式中矩阵 $Q_i > O$ ,  $G_i > O$ ,  $P_i > O$ ,  $R_i > O$ 。其中 $\|x_i^p(jt)\|_{Q_i}^2 + \|u_i^p(jt)\|_{R_i}^2 =: L_{i,1}(x_i^p(jt), u_i^p(1t))$ 表示状态稳定性能,  $\|x_i^p(jt) - \hat{x}_i^p(jt)\|_{G_i}^2 =: L_{i,2}(x_i^p(jt))$ 是关于跟踪误差的惩罚项。 $\|x_i^p(Nt)\|_{P_i}^2 =: E_i(x_i^p(Nt))$ 表示终端惩罚函数,其广泛应用于MPC以保证稳定性。显然状态代价函数

$L_{i,1}(x_i, u_i)$ 、 $L_{i,2}(x_i)$ 以及 $E_i(x_i)$ 是连续的,并且在平衡点是正定的。为了构造约束(式15(f))中的 $\phi$ ,对第*i*辆车在*t*时刻进行求解经典车辆跟踪优化控制问题:

$$\begin{aligned} u_i^0(t) = \arg \min J_i(t) &= \sum_{k=0}^{N_p-1} (J_{1,i}(klt) + \\ & J_{2,i}(klt) + J_{3,i}(klt) + J_{4,i}(klt)) \quad (17a) \\ \left\{ \begin{aligned} (x_i^p(klt), u_i^p(klt)) &\in X_i \times U_i \quad (17b) \\ x_i^p(0t) &= x_i^p(t) \quad (17c) \\ x_i^p(Nt) &\in X_{i,T}, k=0, 1, \dots, N \quad (17d) \\ S_i^p(N_p|t) &= S_i^p(N_p|t) - (i-1)d_{des} - \sum_{j=1}^{i-1} l_j \quad (17e) \end{aligned} \right. \\ \text{s. t. } \left\{ \begin{aligned} |x_{i,1}^p(klt)|_{\infty, \delta} &\leq \theta_i \max_{l \in \{0, \dots, t\}} |x_{i-1,1}^p(klt)|_{\infty, \delta} \quad (17f) \\ |x_{i,1}^p(klt) - \hat{x}_{i,1}^p(klt)|_{\infty} &\leq \varepsilon_{k,i} |x_{i,1}^p(klt)|_{\infty, \delta} (i=1) \quad (17g) \\ |x_{i,1}^p(klt) - \hat{x}_{i,1}^p(klt)|_{\infty} &\leq \varepsilon_{k,i} \min \{ |\hat{x}_{i-1,1}^p(klt)|_{\infty, \delta}, |x_{i,1}^p(klt)|_{\infty, \delta} \} \\ &(i=2, 3, \dots, n) \quad (17h) \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

式中: $u_i^0(t)$ 是式(17)的最优解;式(17g)~式(17h)为附加约束,参数 $\varepsilon_{k,i} \in (0, 1)$ 。注意到关于优化式(15)的最优解 $u_i^*(t)$ 满足式(17b)~式(17f)的约束条件,因此 $u_i^*(t)$ 是优化式(17)的可行解。分别将 $u_i^*(t)$ 和 $u_i^0(t)$ 代入式(16),得到以下值函数:

$$V_{i,i}^*(x_i(t)) = V_{i,i}(x_i(t), u_i^*(t)) \quad (18)$$

$$V_{i,i}^0(x_i(t)) = V_{i,i}(x_i(t), u_i^0(t)) \quad (19)$$

然后定义函数 $\phi$ 为

$$\phi(x_i(t), \beta) = V_{i,i}^0(x_i(t)) + \beta [V_{i,i}^*(x_i(t-1)) - V_{i,i}^0(x_i(t))] \quad (20)$$

式中因子 $\beta \in (0, 1)$ 。

如果式(15)在每个*t*时刻都是可行的,则定义第*i*辆车的DMPC控制律如下:

$$u_i(t) = u_i^{\text{DMPC}}(t) = u_i^*(0t) \quad (21)$$

并有其相应的闭环系统:

$$x_i(t+1) = f_i(x_i(t)) + g_i u_i^{\text{DMPC}}(t) \quad (22)$$

式中 $i=1, 2, \dots, n$ 。

## 2.2 系统稳定性分析

定义1<sup>[28]</sup>:如果系统在某一*t*时刻的速度阶跃变化到 $v_0$ 时,系统能够渐近稳定到原点,则称车辆队列具有跟踪稳定性。

定义2<sup>[28]</sup>:如果一个车辆队列保持内稳定性且关于系统的位置误差满足:

$$\max_{t \geq 0} |e_{q,i}(t)| \leq \theta_i \max_{t \geq 0} |e_{q,i-1}(t)| \quad (23)$$

式中  $\theta_i \in (0, 1)$  表示常数。则称该队列具有弦稳定性。

为了建立车辆队列系统的稳定性,首先对终端元素引入以下常见假设。

假设1:针对第*i*辆车的给定域  $X_{i,T}$ ,存在局部控制律  $\pi_i(x_i)$ 以及正定函数  $E_i(x_i) = \|x_i\|_{P_i}^2 (P_i > O)$ 使得对于任意  $x_i \in X_{i,T}$ ,  $\pi_i(x_i) \in W_i$  以及  $E_i(f_i(x_i, \pi_i(x_i))) - E_i(x_i) \leq -L_{i,1}(x_i, \pi_i(x_i)) - L_{i,2}(x_i)$ 。

函数  $E_i(x_i)$ 是  $\pi_i(x_i)$ 控制下的式(6)的 Lyapunov 函数。如果  $X_{i,T}$ 被选择作为  $E_i(x_i)$ 的水平集,则其也是  $\pi_i(x_i)$ 控制下的第*i*辆车的水平集。

假如存在预测序列  $u_i(k)$ 满足式(15)中对于初始状态  $x_i(0) \in X_i$ 的约束条件,则  $x_i(0)$ 称作初始可行解,所有的初始可行状态构成了式(22)的初始可行集  $X_{i,N}$ 。显然,各类集合满足以下关系:  $X_{i,T} \subseteq X_{i,N} \subseteq X_i, X_{i,N} \subset X_{i,N+1}$ 。

定理1:在假设1的条件下,具有式(16)所示额外约束的式(15)在  $X_{i,N}$ 内具有渐近可行性。

证明:假设在  $t-1$ 时刻,对于  $x_i(t-1) \in X_{i,N}$ 存在满足式(15)和式(16)中的约束的解。将  $u_i^*(t-1)$ 作为优化式(15)的在  $t-1$ 时刻的最优解。为了找到满足式(15)中在下一时刻的约束的优化解,考虑:

$$\hat{u}_i(t) = \{u_i^*(1t-1), \dots, u_i^*(N-1t-1), \pi_i(x_i^*(Nt-1))\} \quad (24)$$

式中状态  $x_i^*(Nt-1)$ 是关于  $u_i^*(t-1)$ 的终端预测状态,其满足  $x_i^*(Nt-1) \in X_{i,T}$ 。

为了获得式(15)在  $t$ 时刻的可行性,首先要证明式(24)在  $t$ 时刻满足式(17)中的约束,并且在  $t$ 时刻式(17)存在最优解并保证式(17)的解是式(15)可行解。

考虑  $(X_{i,T}, \pi_i)$ 满足假设1且  $x_i^*(Nt-1) \in X_{i,T}$ 。由于  $X_{i,T}$ 是  $x_i(t+1) = f(x_i(t), \pi_i(x_i(t)))$ 的不变集,因此可以得到  $\pi_i(x_i^*(Nt-1)) \in U_i$  以及  $\hat{x}_i(Nt) \in X_{i,T}$ 。因此,控制式(24)满足式(17b)-式(17e)所示的约束条件。另外,  $t$ 时刻的最优值函数等同于在  $t-1$ 时刻获得的在预测时域  $[1, N-1]$ 的所有状态代价与终端代价函数  $E_i(\hat{x}_i(Nt))$ 。注意到由于  $X_{i,T}$ 的不变性,所以  $\hat{x}_i(Nt) \in X_{i,T}$ ,因此式(17f)被满足。因此,式(17)在  $t$ 时刻至少存在可行解式(24)以满足其约束。

将序列  $u_i^0(t)$ 作为式(17)在  $t$ 时刻的最优解,根据最优性可得:

$$V_{i,i}^0(x_i(t)) \leq V_{i,i}(x_i(t), \hat{u}_i(t)) \quad (25)$$

然后再次考虑可行解(24),通过推导得到

$$V_{i,i}^0(x_i(t)) - V_{i,i}^*(x_i(t-1)) \leq V_{i,i}(x_i(t), \hat{u}_i(t)) - V_{i,i}^*(x_i(t-1))$$

令  $\Delta = V_{i,i}(x_i(t), \hat{u}_i(t)) - V_{i,i}^*(x_i(t-1))$ 。根据式(16)可以得到:

$$\begin{aligned} \Delta &= \|\hat{x}_i(Nt)\|_{P_i} + \|x_i^*(Nt-1)\|_{Q_i} + \\ &\|x_i^*(Nt-1) - \hat{x}_{i-1}(Nt-1)\|_{C_i} + \\ &\|\pi_i(x_i^*(Nt-1))\|_{R_i} - \|x_i^*(Nt-1)\|_{P_i} - \\ &\|x_i^*(0t-1)\|_{Q_i} - \|u_i^*(0t-1)\|_{Q_i} - \\ &\|x_i^*(0t-1) - \hat{x}_{i-1}(0t-1)\|_{C_i} \end{aligned}$$

根据假设1可得

$$\Delta \leq -\|x_i^*(0t-1)\|_{Q_i} - \|x_i^*(0t-1) - \hat{x}_{i-1}(0t-1)\|_{C_i} \leq 0 \quad (26)$$

由此得到的式(20)是正定的。因此,不等式(15f)成立,则控制式(24)是式(15)的可行解,证明完毕。

在式(15)是初始可行的前提下,可证明闭环系统的跟踪稳定性。

定理2:如果式(15)是初始可行的且假设1成立,则闭环队列控制系统的平衡点在吸引域  $X_N = X_{N,1} \times X_{N,2} \times \dots \times X_{N,n}$ 是渐近稳定的。

证明:由于式(15)在初始时刻可行,根据定理1可知,优化式(15)在  $t$ 时刻总是可行的。使  $u_i^*(t-1)$ 以及  $u_i^*(t)$ 别作为优化式(15)在  $t-1$ 时刻和  $t$ 时刻的最优解。考虑约束式(15f)和式(20)推导可得:

$$V_{i,i}^*(x_i(t)) - V_{i,i}^*(x_i(t-1)) \leq (1-\beta)[V_{i,i}^0(x_i(t)) - V_{i,i}^*(x_i(t-1))] \quad (27)$$

根据假设1,将式(26)代入到不等式(27)可以得到  $V_{i,i}^*(x_i(t)) - V_{i,i}^*(x_i(t-1)) = (\beta-1)[\|x_i^*(0t-1)\|_{Q_i} + \|x_i^*(0t-1) - \hat{x}_{i-1}(Nt-1)\|_{C_i}]$ ,由于  $\beta \in (0, 1)$ 且  $V_{i,i}(x_i, u_i)$ 在平衡点上是正定函数,因此式(18)所示的值函数沿式(22)所示系统单调递减。由此可得,当  $i=1, \dots, n$ 时,第*i*车的闭环系统的平衡点是渐近稳定的。因为  $X_{i,N}$ 是第*i*辆车的闭环系统的不变集,所以  $X_N$ 是车辆队列系统的吸引域。

定理3:在定理2的条件下,如果式(17f)-式(17h)所示的约束条件成立,则车辆队列式(22)所示系统满足弦稳定性。

证明:定理3的证明参考文献[28],本章只给出了证明的简单介绍。在定理2的条件下,式(15)问题在任意时刻都是可行的,并且式(22)所示闭环系统在平衡点处具有渐近稳定性。通过选择合适的参

数  $\varepsilon_{k,i}$ , 能够保证不等式(17g)和不等式(17h)一定成立。结合式(17f)-式(17g)可以得到不等式(23), 由此根据定义2得到式(22)所示车辆队列系统的弦稳定性。

### 3 目标函数求解方法

对于目标函数中的非线性不连续目标值经济指标, 需要使用查找表来获得当前速度和制动强度下的再生制动功率<sup>[29]</sup>。传统的二次规划算法难以求解。在这种情况下, 启发式算法可以根据概率方法来解决问题。本文采用模拟退火和粒子群优化算法求解目标函数, 流程图如图3所示。

将约束写成惩罚函数  $C$ :

$$C_i(k) = \begin{cases} 0, & \text{满足条件} \\ +\infty, & \text{不满足条件} \end{cases} \quad (28)$$

$$C(k) = \sum_{i=1}^N C_i(k) \quad (29)$$

具体步骤如下。

(1) 初始化每个粒子参数。车队中每辆车的加速度值构成一个粒子群  $p_1 = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ , 粒子群规模  $N$  等于车队成员的数量。初始化时设置随机更新因子  $c_1$ , 退火速率  $\lambda$ , 最大迭代次数  $i_{\max}$  和最小适应度值  $d_{\text{stop}}$ , 其中  $d_{\text{stop}}$  设为较大常数。

(2) 设置适应度函数。将目标函数作为适应度函数的一部分; 另一部分是作为惩罚函数  $C(k)$  的约束集。计算并记录初始化粒子在适应度函数下的适应度函数值,  $d_{\text{stop}}$  等于该适应度值, 记录对应的粒子种群为  $p_g$ , 由此时每辆车的加速度值构成。

(3) 令初始温度为最小适应度值, 即  $t_0 = d_{\text{stop}}$ 。

(4) 利用随机更新因子  $c_1$ , 加速度范围和种群  $p_g(i)$ , 得到一组新的粒子种群  $p_g(i+1)$ , 随后  $i$  自加1, 直到达到最大迭代次数  $i_{\max}$ , 如式(30)所示。

$$p_g(i+1) = p_g(i) + c_1 [a_{\min}, a_{\max}]_N \quad (30)$$

(5) 记录当前温度  $t$  下的适应度函数值  $d_{\text{temp}}$ , 如果  $d_{\text{temp}} \leq d_{\text{stop}}$ , 则加速度粒子种群  $p_f$  接受并等于  $d_{\text{temp}}$  对应的加速度粒子种群  $p_g$ 。如果  $d_{\text{temp}} > d_{\text{stop}}$ , 则  $p_f$  以  $\exp\left[-\frac{d_{\text{temp}} - d_{\text{stop}}}{t}\right]$  的概率接受  $p_g$ , 使  $p_f = p_g(i+1)$ , 或以  $1 - \exp\left[-\frac{d_{\text{temp}} - d_{\text{stop}}}{t}\right]$  的概率接受  $p_g$  不变, 如式(31)-式(32)所示。

$$\text{if } d_{\text{temp}} \leq d_{\text{stop}}: p_f = p_g(i+1) \quad (31)$$

if  $d_{\text{temp}} > d_{\text{stop}}$ :

$$p_f = \begin{cases} p_g(i+1), P = \exp\left[-\frac{d_{\text{temp}} - d_{\text{stop}}}{t}\right] \\ p_g(i), P = 1 - \exp\left[-\frac{d_{\text{temp}} - d_{\text{stop}}}{t}\right] \end{cases} \quad (32)$$

(6) 返回到第(4)步, 直到  $i$  达到  $i_{\max}$ , 然后令  $i = 1, p_g(i) = p_f$ 。

(7) 进行冷却操作  $t_{k+1} = \lambda t_k$ 。

(8) 冷却后返回第(4)步, 直至达到最低温度, 此时输出加速度粒子和式(15)的全局最优解  $u_i^*(t)$ 。

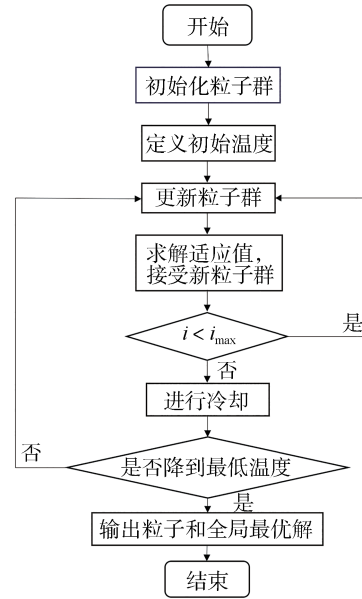


图3 模拟退火和粒子群优化算法流程图

### 4 延迟条件下控制系统设计

在非理想通信条件下, 为上述 DMPC 系统添加延迟补偿环节, 它由缓冲器、补偿器和 DMPC 模块组成, 如图4所示。缓冲器根据信息拓扑接收来自其他车辆的数据, 并通过与缓存数据进行比较来选择最新的数据。延迟补偿器预测具有延迟的假设状态, 并在预测时域内得到假设状态的估计值。在 DMPC 模块中, 依据车辆的非线性纵向动力学模型计算控制输入, 并将自车的假设状态发送给相邻车辆。这种控制结构适用于队列中所有被控车辆。下文对处理时间延迟的缓冲器和补偿器进行设计。

当采用非理想通信网络传输前车和相邻车辆的状态时, 时延和丢包等特性对队列的性能影响很大。当丢包发生时, 车辆无法接收信息。因此, 它可以看

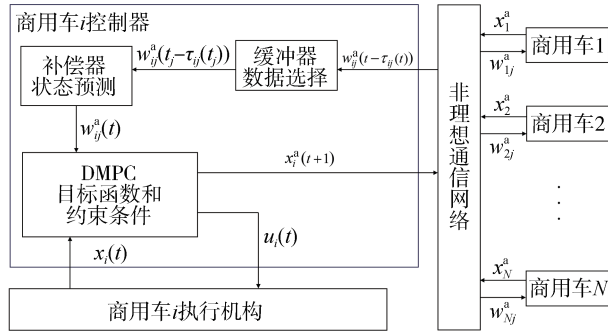


图4 延迟补偿环节示意图

作是一个无限的延迟,它的统一特征是传输数据的时间戳。车辆之间传输的数据包括时间戳、车辆代码和假设状态轨迹,这些数据由DMPC生成,并根据最优解表示未来可能的轨迹。假设预测域为  $N_p$ , 车辆  $j$  通过通信网络向车辆  $i$  传输信息时存在一定的时延  $\tau_{ij}(t)$ 。车辆  $j$  在  $t$  时刻发送和车辆  $i$  接收的假设状态轨迹与真实值相比存在一定的时间延迟可以定义为

$$w_{ij}(t - \tau_{ij}(t)|t - \tau_{ij}(t)) = \begin{bmatrix} \chi_j^a(t - \tau_{ij}(t)|t - \tau_{ij}(t)) \\ \chi_j^a(t - \tau_{ij}(t) + 1|t - \tau_{ij}(t)) \\ \dots \\ \chi_j^a(t - \tau_{ij}(t) + N_p - 1|t - \tau_{ij}(t)) \end{bmatrix} \quad (33)$$

缓冲器和补偿器选择并预测状态以获得可用于DMPC计算的估计值。在缓冲器中,在时刻  $t$ ,将新到达的数据  $w_{ij}^a(t - \tau_{ij}(t)|t - \tau_{ij}(t))$  与到达  $t_0$  的缓存数据  $w_{ij}^a(t_0 - \tau_{ij}(t_0)|t_0 - \tau_{ij}(t_0))$  进行比较。新数据根据数据的时间戳存储并传输到补偿器,而旧数据则被删除。当没有数据到达  $t$  时,输出缓存数据  $w_{ij}^a(t_0 - \tau_{ij}(t_0)|t_0 - \tau_{ij}(t_0))$ 。

在补偿器中,对时滞引起的误差进行补偿,得到预测时域  $[t, t + N_p - 1]$  中前导车辆和相邻车辆的假设状态估计,即假设状态估计。保留  $[t, t_j - \tau_{ij}(t_j) + N_p - 1]$  预测范围内的假设状态,并用预测算法补偿超出的部分。对于1s时间的短期预测问题,基于运动学的预测方法能够以合理的计算速度进行准确预测<sup>[30]</sup>。此外,由于无法直接获得相邻车辆的精确动力学模型,因此利用运动学模型进行状态预测可以适应大多数工况。因此,采用恒速法来预测车辆的未来状态。基于恒速法的基本轨迹预测方程如下:

$$\begin{cases} p(t+1) = p(t) + v(t)\Delta t \\ v(t+1) = v(t) \end{cases} \quad (34)$$

车辆的估计状态与真实状态之间存在一定的误差,且误差大小受预测算法的影响。但考虑到车速、加速度、转矩和预测时域的限制,估计误差可以控制在一定范围内。因此,估计误差存在一个上限。 $t+k$  时的假设状态估计可表示为

$$\bar{\chi}_j^a(t + k|t_j - \tau_{ij}(t_j)) = \begin{cases} \chi_j^a(t + k|t_j - \tau_{ij}(t_j)), & t + k \leq t_j - \tau_{ij}(t_j) + N_p - 1 \\ \hat{\chi}_j^a(t + k|t_j - \tau_{ij}(t_j)), & t + k > t_j - \tau_{ij}(t_j) + N_p - 1 \end{cases} \quad (35)$$

其中:

$$\hat{\chi}_j^a(t + k|t_j - \tau_{ij}(t_j)) = \hat{\chi}_j^a(t_j - \tau_{ij}(t_j) + N_p - 1|t_j - \tau_{ij}(t_j))(1 + \Delta t \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (t + k - (t_j - \tau_{ij}(t_j) + N_p - 1)))$$

$$\bar{\tilde{w}}_{ij}^a(t|t_j - \tau_{ij}(t_j)) = \begin{bmatrix} \bar{\chi}_j^a(t|t_j - \tau_{ij}(t_j)) \\ \bar{\chi}_j^a(t + 1|t_j - \tau_{ij}(t_j)) \\ \dots \\ \bar{\chi}_j^a(t + N_p - 1|t_j - \tau_{ij}(t_j)) \end{bmatrix} \quad (36)$$

随后,车辆  $j$  得到估计的假设状态轨迹如下:

具有时间延迟的原始数据通过缓冲器后,可以避免时延下由于时间无序引起的控制输入重复振荡的影响。补偿器进一步估计当前状态,以减少由时间延迟引起的状态误差对控制器的影响。特别是在连续多次采样没有接收到新数据时,补偿器可以根据数据产生时间和预测算法获得合理的当前状态估计,而不是采用不正确的恒定车辆状态。随后,可以将估计值  $\bar{\tilde{w}}_{ij}^a(t)$  直接用于DMPC问题,以获得误差可接受的控制输入。

## 5 试验验证

利用 Matlab/Simulink 仿真,验证上述方法的控制效果。异质商用车队列的车辆动力学参数如表1所示。考虑到非理性通信条件的影响,添加了0.25s的恒定时间延迟,以比较控制系统在时延条件下的

控制效果。

表1 异质队列车辆主要参数

车辆序号	质量/kg	车身长度/mm	车轮滚动半径/m	车辆迎风面积/m <sup>2</sup>
1	4 000	5 500	0.35	2.5
2	4 500	6 000	0.40	3.0
3	5 000	6 500	0.45	3.5
4	5 500	7 000	0.50	4.0
5	6 000	7 500	0.55	4.5

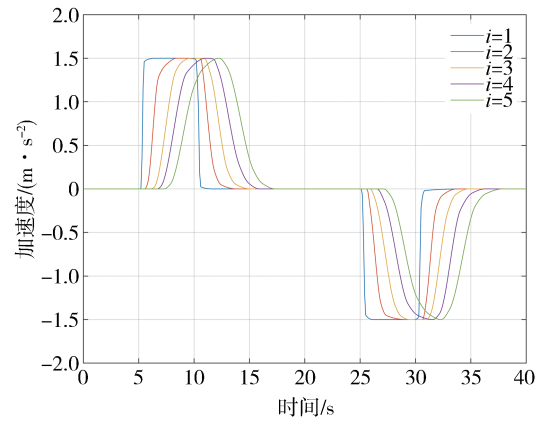
试验轨迹由领航车的期望加速度  $a_{1,des}(t)$  定义, 其由阶跃函数组成, 如式(25)所示。队列内每辆车的初始速度为 18 m/s, 初始加速度为 0。

$$a_{1,des}(t) = \begin{cases} 1.5, & 5 \leq t < 10 \\ -1.5, & 25 \leq t < 30 \end{cases} \quad (37)$$

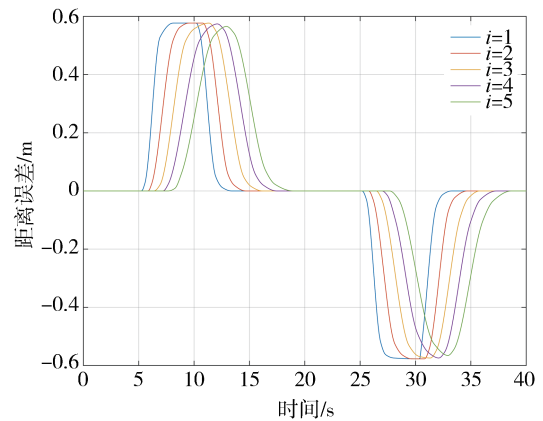
将传统 MPC 的性能、普通 DMPC 控制器的性能与集成延迟补偿的 DMPC 控制器的性能进行了比较, 分别如图 5~图 7 所示。3 种控制器的能耗情况如图 8 所示。为了清晰地比较 3 种控制器的控制效果, 计算出它们的平均距离误差、总能耗、平均加加速度和平均速度误差, 结果如表 2 所示。

由图 5(a)、图 6(a)和图 7(a)可知, 商用车队列在 MPC 控制器、不集成延迟补偿的 DMPC 控制器和集成延迟补偿的 DMPC 控制器的控制下均可按期望加速度正常行驶, 但是 DMPC 控制下的队列响应更快; 由表 2 可知, 不集成延迟补偿的 DMPC 控制器相比 MPC 控制器减小 58.7% 的距离误差, 集成延迟补偿的 DMPC 控制器相比 MPC 控制器减小 76.3% 的距离误差, 因此所提出的 DMPC 控制器具有更好的跟随性。由图 8 可知, DMPC 控制下的商用车队列能耗更低, 比 MPC 控制器的能耗减少了 9.9%, 因此本文提出的 DMPC 控制方法使队列获得更好的经济性。在舒适性方面, 由图 5(c)、图 6(c)和图 7(c)可见, DMPC 控制下的车队平均加加速度更小, 与 MPC 相比减小了 26.8%, 故具有更好的舒适性。

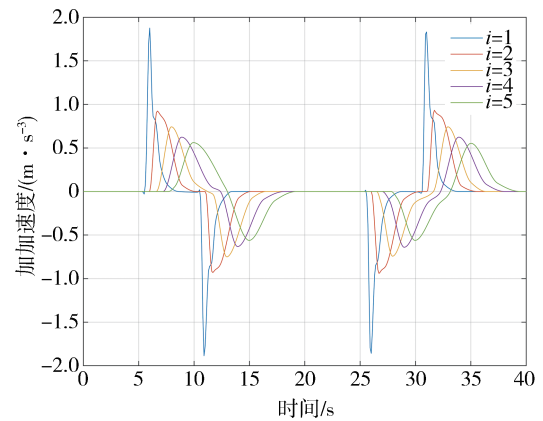
在非理想通信条件下, 由表 2 可知, 与 MPC 控制器相比, DMPC 控制器可减少 58.7% 的距离误差, 在添加了第 4 节提出的延迟补偿器和缓冲器后, 距离误差进一步减少 42.6%, 所以具有延迟补偿的



(a) 加速度



(b) 距离误差和



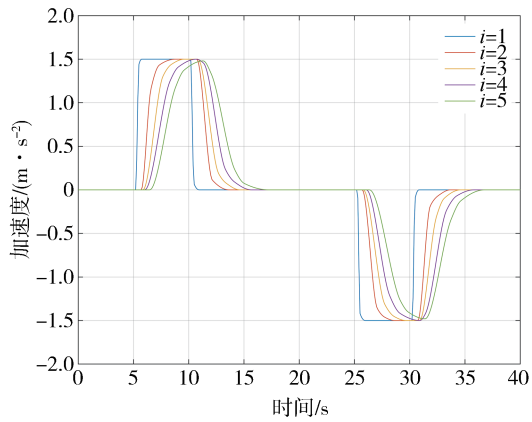
(c) 加加速度

图5 MPC 控制下的性能曲线

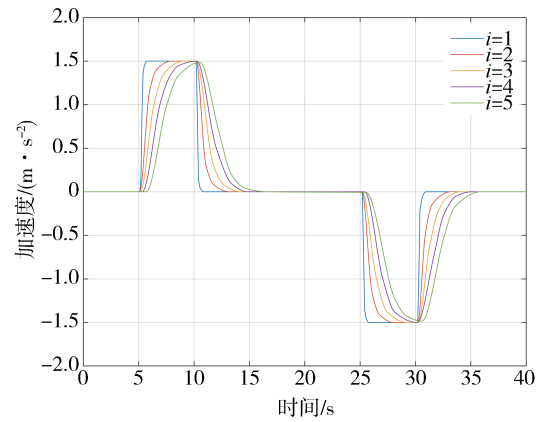
DMPC 控制器在通信时延的影响下能有效减小时滞

表2 控制效果对比

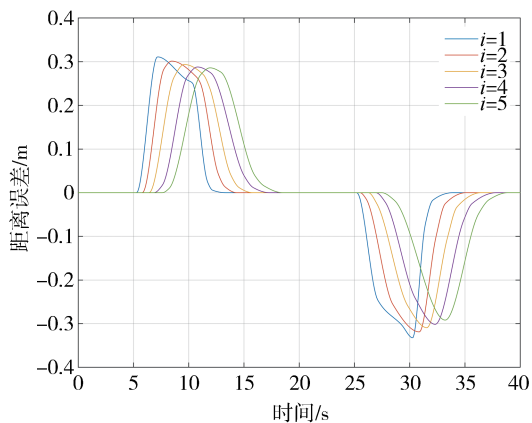
参数		MPC 控制器	不集成延迟补偿的 DMPC 控制器	集成延迟补偿的 DMPC 控制器
跟随性、延迟补偿效果	平均距离误差/m	0.372 5	0.153 9	0.088 3
经济性	总能耗/(kW·h)	1.42	1.28	1.07
舒适性	平均加加速度/(m·s <sup>-3</sup> )	0.583 7	0.427 2	0.402 1



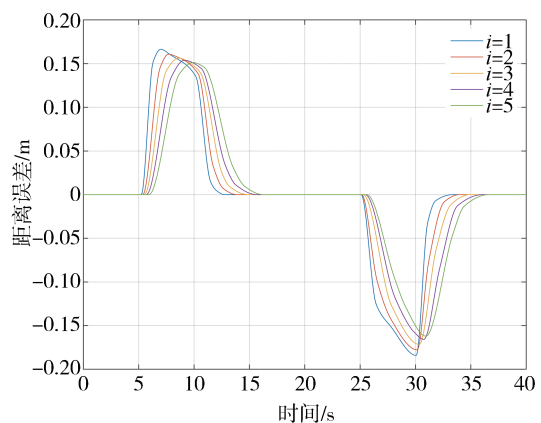
(a) 加速度



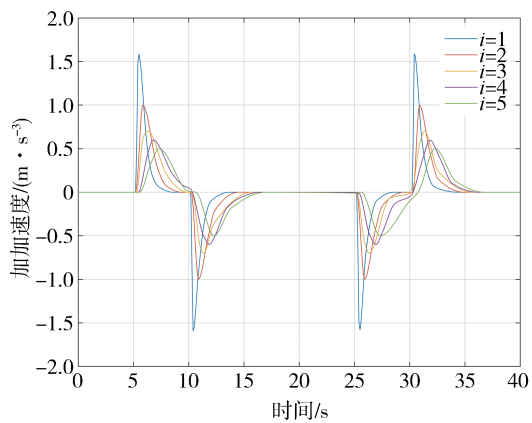
(a) 加速度



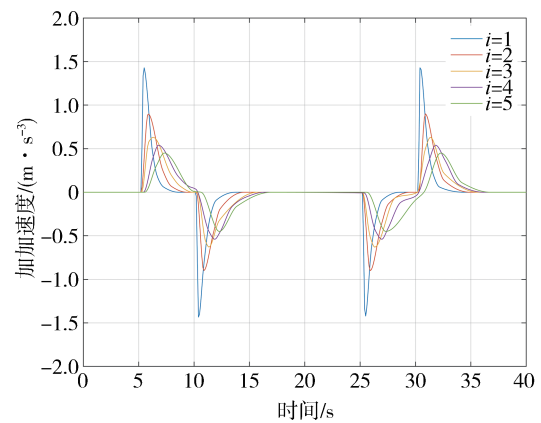
(b) 距离误差和



(b) 距离误差和



(c) 加加速度



(c) 加加速度

图6 不集成延迟补偿的DMPC控制下的性能曲线

图7 集成延迟补偿的DMPC控制下的性能曲线

的不利影响,获得尽可能小的跟车距离误差。

## 6 结论

本文以纯电动异质商用车队为研究对象,提出了一种分布式模型预测控制算法,为队列中的车辆

设计了兼顾跟随性、经济性和舒适性等优化目标的代价函数,证明了系统的跟踪稳定性和弦稳定性,并利用模拟退火和粒子群优化算法在预测范围内求解。针对时滞条件带来的负面影响,在控制器上集成缓冲器和延迟补偿器,改善异质商用车队在延迟条件下的控制效果,以实现非理想通信条件下的稳

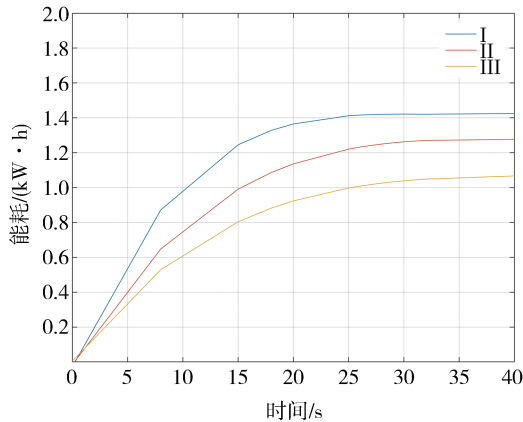


图8 3种控制器总能耗曲线图(I为MPC控制器, II为不集成延迟补偿的DMPC控制器, III为集成延迟补偿的DMPC控制器)

定控制。

仿真结果表明,与MPC控制器相比,本文提出的DMPC控制器可减小队列行驶过程中的距离误差、能耗和平均加速度,在跟随性、经济性和舒适性等方面能实现更好的控制效果。在集成了缓冲器和延迟补偿器后,进一步改善控制效果,保证车队在非理想通信条件下能够稳定行驶。

### 参考文献

- [1] WANG Z, BIAN Y, SHLADOVER S E, et al. A survey on cooperative longitudinal motion control of multiple connected and automated vehicles [J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems*, 2020, 12(1): 4–24.
- [2] 薛杨. 基于模糊PID控制的车辆纵向优化CACC系统[D]. 长春: 吉林大学, 2015.  
XUE Yang. Vehicle longitudinal optimization CACC system based on fuzzy PID control [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [3] VICENTE Milanés, STEVEN E. Shladover, JOHN Spring, et al. Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(1): 296–305.
- [4] 刘骝. 基于多目标决策算法和PID控制的CACC系统的优化与仿真[D]. 长春: 吉林大学, 2016.  
LIU Liu. Optimization and simulation of CACC system based on multi objective decision algorithm and PID control [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [5] BAYEZIT I, VELDHUIZEN T, FIDAN B, et al. Design of string stable adaptive cruise controllers for highway and urban missions [C]. *Communication, Control, & Computing. IEEE*, 2013.
- [6] PENG H, LI D, ABOUD K, et al. Performance analysis of DCF for multi-platooning communications with autonomous vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(3): 2485–2498.
- [7] JIA D, LU K, WANG J. On the network connectivity of platoon-based vehicular cyber-physical systems [J]. *Transp. Res. Part C: Emerging Technol*, 2014, 40: 215–230.
- [8] LAN J, ZHAO D. Min-max model predictive vehicle platooning with communication delay [J]. *IEEE Transactions on Vehicle Technology*, 2020, 69(11): 12570–12584.
- [9] YAN M, MA W, ZUO L, et al. Distributed model predictive control for platooning of heterogeneous vehicles with multiple constraints and communication delays [J]. *Adv. Transp*, 2020: 1–16.
- [10] 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*, 2020, 22(9): 5496–5507.
- [11] 王志文, 王沛禄, 高红红. 自主车队纵向控制器设计及仿真研究 [J]. *陕西科技大学学报*, 2014(6): 165–169.  
WANG Zhiwen, WANG Peilu, GAO Honghong. Design and simulation study of longitudinal controller for autonomous vehicle fleet [J]. *Journal of Shaanxi University of Science and Technology*, 2014 (6): 165–169.
- [12] 张亮修, 吴光强, 郭晓晓. 车辆自适应巡航控制系统的建模与分层控制 [J]. *汽车工程*, 2018, 40(5): 547–553.  
ZHANG Liangxiu, WU Guangqiang, GUO Xiaoxiao. Modeling and hierarchical control of vehicle adaptive cruise control system [J]. *Automotive Engineering*, 2018, 40 (5): 547–553.
- [13] SHI Shengling, MIRCEA Lazar. On distributed model predictive control for vehicle platooning with a recursive feasibility guarantee [J]. *IFAC Papers On Line*, 2017, 50(1): 7193–7198.
- [14] VAN NUNEN E, REINDERS J, SEMSAR-KAZEROONI E, et al. String stable model predictive cooperative adaptive cruise control for heterogeneous platoons [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2019, 4(2): 186–196.
- [15] GUO Ge, LI Ping, HAO Liying. A new quadratic spacing policy and adaptive fault-tolerant platooning with actuator saturation [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 23(2): 1200–1212.
- [16] HU Yuying, CHEN Cailian, HE Jianping, et al. Eco-platooning for cooperative automated vehicles under mixed traffic flow [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(4): 2023–2034.
- [17] PIRANI M, BALDI S, JOHANSSON K H. Impact of network topology on the resilience of vehicle platoons [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23 (9) : 15166–15177.
- [18] GAO Feng, HU Xiaosong, LI Shengbo eben, et al. Distributed adaptive sliding mode control of vehicular platoon with uncertain interaction topology [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 65(8): 6352–6361.
- [19] PAN Chengwei, CHEN Yong, LIU Yuezhi, et al. Adaptive resilient control for interconnected vehicular platoon with fault and saturation [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 23(80): 10210–10222.
- [20] TYLER Ard, BIBIN Pattel, ARDALAN Vahidi, et al. Consider-

- ate and cooperative model predictive control for energy-efficient truck platooning of heterogeneous fleets [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(6): 5755–5769.
- [21] ZHANG Yu, BAI Yu, WANG Meng, et al. Cooperative adaptive cruise control with robustness against communication delay: an approach in the space domain[C]. *American Control Conference*, 2022.
- [22] XU Liwei, ZHUANG Weichao, YIN Guodong, et al. Modeling and robust control of heterogeneous vehicle platoon on curved road subject to disturbances and delays[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(99): 11551–11564.
- [23] XU Liwei, ZHUANG Weichao, YIN Guodong, et al. Stable longitudinal control of heterogeneous vehicular platoon with disturbances and information delays [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 69794–69806.
- [24] YU Guokuan, WONG Pak Kin, HUANG Wei, et al. Distributed adaptive consensus protocol for connected vehicle platoon with heterogeneous time-varying delays and switching topologies [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(10): 17620–17631.
- [25] TIAN Bin, WANG Guanqun, XU Zhigang, et al. Communication delay compensation for string stability of CACC system using LSTM prediction [J]. *Vehicular Communications*, 2021, 29: 100333.
- [26] 王雪彤,罗禹贡,江发潮,等.纯电动商用车异质队列的多目标控制[J].*汽车工程*, 2020, 42(4): 505–512,559.  
WANG Xuetong, LUO Yugong, JIANG Fachao, et al. Multi-target control for heterogeneous platoon of battery electric commercial vehicle [J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42 (4): 505–512,559.
- [27] XU Hao, TU Ran, LI Tiezhu, et al. Interpretable bus energy consumption model with minimal input variable considering power-train types [J]. *Transportation Res Part D: Transportation Environment*, 2023, 119: 103742.
- [28] DUNBAR W B, CAVENEY D S. Distributed receding horizon control of vehicle platoons: stability and string stability [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57 (3) : 620–633.
- [29] MA Hao, CHU Liang, GUO Jianhua, et al. Cooperative adaptive cruise control strategy optimization for electric vehicles based on SA-PSO with model predictive control [J]. *IEEE Access*, 2020: 3043370.
- [30] LEFEVRE S, VASQUEZ D, LAUGIER C. A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles [J]. *Robomech Journal*, 2014, 1: 1–14.

~~~~~

(上接第417页)

- [2] HUANG C W, MAAS R, MALLIDI S H, et al. A study for improving device-directed speech detection toward frictionless human-machine interaction[C]. *INTERSPEECH*. [S.l.:s.n.], 2019: 3342–3346.
- [3] GILLESPIE K, KONSTANTAKOPOULOS I C, GUO X, et al. Improving device directedness classification of utterances with semantic lexical features[C]. *ICASSP 2020–2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. [S.l.:s.n.], 2020: 7859–7863.
- [4] YAMAGATA T, TAKIGUCHI T, ARIKI Y. System request detection in human conversation based on multi-resolution gabor wavelet features [C]. *Tenth Annual Conference of the International Speech Communication Association*. [S.l.:s.n.], 2009.
- [5] REICH D, PUTZE F, HEGER D, et al. A real-time speech command detector for a smart control room[C]. *Twelfth Annual Conference of the International Speech Communication Association*. [S.l.:s.n.], 2011.
- [6] SHRIBERG E, STOLCKE A, HAKKANI-TÜR D, et al. Learning when to listen: detecting system-addressed speech in human-human-computer dialog[C]. *Thirteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association*. [S.l.:s.n.], 2012.
- [7] LEE H, STOLCKE A, SHRIBERG E. Using out-of-domain data for lexical addressee detection in human-human-computer dialog [C]. *Proceedings of the 2013 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*. [S.l.:s.n.], 2013: 221–229.
- [8] PAKK T, HORVITZ E, RINGGER E K. Continuous listening for unconstrained spoken dialog [C]. *INTERSPEECH*. [S.l.:s.n.], 2000: 138–141.
- [9] DOWDING J, ALENA R, CLANCEY W J, et al. Are you talking to me? dialogue systems supporting mixed teams of humans and robots [C]. *AAAI Fall Symposium: Aurally Informed Performance*. [S.l.:s.n.], 2006: 22–27.
- [10] NOROUZIAN A, MAZOURE B, CONNOLLY D, et al. Exploring attention mechanism for acoustic-based classification of speech utterances into system-directed and non-system-directed [C]. *ICASSP 2019–2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. [S.l.:s.n.], 2019: 7310–7314.
- [11] TONG X, HUANG C W, MALLIDI S H, et al. Streaming Res LSTM with causal mean aggregation for device-directed utterance detection[C]. *2021 IEEE Spoken Language Technology Workshop (SLT)*. [S.l.:s.n.], 2021: 659–664.
- [12] HOWARD A, ZHU M. Fine-tuning large pre-trained models for language understanding[J]. *Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 2019.
- [13] LIU Xiao, JI Kaixuan. P-tuning v2: prompt tuning can be comparable to fine-tuning universally across scales and tasks [J]. *arXiv preprint arXiv:2110.07602*, 2021.