

网联车辆编队节油速度轨迹优化和分布式控制

杨冬琪^{1,2}, 段洪君³, 郭戈^{3,4†}, 张忍永康²

(1. 中国电子科技集团公司 信息科学研究院, 北京 100042; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004;

3. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 4. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 本文研究了网联车辆编队的节油速度轨迹优化和分布式控制问题. 考虑异质车辆编队节油, 采用一种基于滚动时域优化的速度规划算法, 求解出适应于变化道路坡度的编队整体节油速度. 此外, 为了提高速度规划和调节的灵活性, 提出了一种基于期望编队速度的二次间距策略. 采用基于间距误差最小化的分布式凸优化算法对轨迹优化问题进行求解, 为所有跟随车提供最优轨迹. 在此基础上, 设计了一种具有双幂次趋近律的PID型滑模控制器, 使得各跟随车跟踪最优轨迹. 仿真结果表明, 该方法可在忽略空间和速度扰动的情況下保证车辆的内部稳定性和队列稳定性.

关键词: 节油速度; 分布式轨迹优化; 速度相关型间距策略; 滑模控制; 网联车辆编队; 队列稳定性

引用格式: 杨冬琪, 段洪君, 郭戈, 等. 网联车辆编队节油速度轨迹优化和分布式控制. 控制理论与应用, 2024, 41(12): 2249 – 2258

DOI: 10.7641/CTA.2023.20929

Optimizing fuel-saving speed trajectory and distributed control for connected automatic vehicles platoon

YANG Dong-qi^{1,2}, DUAN Hong-jun³, GUO Ge^{3,4†}, ZHANG Ren-yong-kang²

(1. Information Science Academy, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100042, China;

2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;

3. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao Hebei 066004, China;

4. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Industrial Process, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China)

Abstract: In this paper, the fuel-saving speed trajectory optimization and the distributed control of connected automatic vehicle platoon are studied. Considering the fuel saving problem of heterogeneous connected automatic vehicles platoon, a receding horizon dynamic programming is adopted to solve the entire platoon's fuel-saving speed adapted to the changing road slope. In addition, in order to improve the flexibility of speed planning and adjustment, a quadratic spacing strategy based on the expected platoon speed is proposed. The distributed convex optimization algorithm based on the minimization of spacing error is used to solve the trajectory optimization problem, providing the optimal trajectory for all following vehicles. On this basis, a PID sliding mode controller with dual power reaching law is derived to control the speed of each following vehicle. The simulation results show that this method can ensure the internal stability and string stability of the vehicle with negligible space and speed disturbances.

Key words: fuel-saving velocity; distributed trajectory optimization; velocity dependent spacing strategy; sliding mode control; connected automated vehicle platoon; string stability

Citation: YANG Dongqi, DUAN Hongjun, GUO Ge, et al. Optimizing fuel-saving speed trajectory and distributed control for connected automatic vehicles platoon. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(12): 2249 – 2258

1 引言

迅猛发展的经济给道路交通环境带来了前所未有的负担: 交通拥堵、空气污染事故等严重问题已成为亟待解决的难题^[1-2]. 受到城市空间基础设施建设预

算等方面的约束, 通过拓宽路面和铺设新道路等措施来解决上述问题并非最好的选择. 通过智能交通系统 (intelligent transportation system, ITS) 来提高安全性和通行效率, 以及降低燃料消耗和污染成为学术界关

收稿日期: 2022-10-24; 录用日期: 2023-10-24.

†通信作者. E-mail: geguo@yeah.net.

本文责任编辑: 施阳.

国家自然科学基金项目(U21B2042, U22B2056, U23B2038, 62173079, U1808205), 甘肃省科技重大专项项目(21ZD4GA028)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (U21B2042, U22B2056, U23B2038, 62173079, U1808205) and the Science and Technology Program of Gansu Province (21ZD4GA028).

注的焦点^[3]. 车辆编队协作控制 (cooperative control of vehicle platoons, CCVP) 被认为是 ITS 中最有希望解决这些问题的方法之一, 该方法将道路上的车辆保持紧密间距和一致的速度^[4], 以增加道路容量并降低燃料消耗^[5]. 由于编队中车辆的动态耦合, 队列稳定性是编队安全、顺畅行进的必要条件^[6-7]. 为了使车辆编队行驶的更加平顺, 车辆应配合一定的通信拓扑、良好的控制算法和适当的间距策略^[8-9].

近些年来, 车辆编队的轨迹优化和控制问题得到了广泛关注. Wen等人^[10]提出了一种用于轨迹优化和跟踪控制的分布式层次结构框架, 实现了间距误差最小化. 在文献[4]中, 针对文献[10]存在误差收敛速度较慢和抗抖振性能较差等问题, 设计了一种改进的PID型滑模控制器, 相比车辆编队传统滑模控制算法^[11], 具有更好的暂态和稳态性能. 然而, 这些方法中的编队速度均是任意给定的, 未能考虑受到实际交通环境影响的速度规划节油效果. 在交通运输领域, 对车辆进行节油速度控制具有重要研究价值. 尤其是以载重为主的商用交通运输, 节油可以减少整个经济发展对能源的需求, 以尽可能少的能源消耗来获得尽可能多的经济效益.

利用适当的速度减小行驶阻力和行程时间是节油的重要途径, 最近, Hussein等在文献[12]中利用经验数据建模, 研究了车辆编队(轻型车辆、公共汽车和重型卡车)中车辆位置和间距对其阻力系数的影响, 然后使用约束优化公式拟合模型, 将经验数据外推到泛化的车辆编队中. Goetze等人在文献[13]中提出了与车辆速度、加速度和重力水平分量等效加速度相关的能量/燃料消耗模型, 这是目前进行车辆油耗建模和电力拖动汽车能耗建模中广泛采纳的模型. 利用这些先验模型对编队进行速度规划是车辆的队列控制中成本最低且最有效的节油方法. Li等人针对纵向编队的自适应巡航控制系统, 在文献[14]中提出了一种周期伺服环路纵向控制算法, 以最小化跟车时的油耗, 然而, 该控制算法仅考虑了车辆间距对油耗的影响. Xu等人^[15]利用模型预测控制方法, 建立油耗成本函数, 针对车辆行驶过程进行前瞻域内的节油优化. Guo等人在文献[3]中给出了基于时间和油耗混合成本的节油优化问题解析解, 该解通过滚动动态规划求得, 尽管在全局上达到了最优, 但在暂态过程中, 没有从舒适性、安全性等角度考虑间距误差的最小化问题.

针对上述研究工作的不足, 本文引入了速度规划-分层控制框架, 考虑了速度优化的节油和平顺两方面效果, 提高速度调节的灵活性. 在速度规划层, 采用文献[13]提出的油耗近似模型, 并针对车辆编队整体建模, 基于耗油率和时间混合成本的代价函数, 给出由滚动时域优化方法得出的编队节油速度. 在车辆控制层的上层, 使用分布式连续时间凸优化技术, 依据

时变的节油速度和二次间距策略, 为每辆车求解出满足间距误差最小化的参考信号; 在下层设计改进型的PID滑模控制器, 使得车辆跟踪最优参考信号, 并具有更好的鲁棒性和抗干扰能力. 通过构造跟踪误差和李雅普诺夫函数, 证明了单车闭环误差控制系统的稳定性和队列稳定性. 本文的主要贡献如下:

1) 引入一种节油速度轨迹规划算法: 针对异质编队, 优化燃油利用率, 推导出基于油耗-时间混合成本和滚动时域优化策略的速度规划算法, 该算法的计算复杂度低于基于动态规划(dynamic programming, DP)的经典算法, 并且易于在车辆编队控制过程中实时应用;

2) 设计了一种分层控制框架: 针对期望的编队速度, 进行确保间距误差最小化的分布式控制, 使用分布式连续时间凸优化技术为每辆车提供了参考位置和速度信号, 设计改进型PID滑模控制器跟踪参考信号, 实现优化和控制的解耦.

符号说明: \mathbb{R}^n 表示 n 维欧几里得空间, $\text{diag}\{\cdot\}$ 是对角矩阵, 矩阵不等式 $A > B$ ($A \geq B$)意味着 $A - B$ 是正定或半正定, $\|x\|_p$ 表示向量 x 的 p -范数. A^T 表示矩阵 A 的转置, 符号 \otimes 是矩阵的Kronecker积运算符, $\lambda_{\min}(A)$ 表示矩阵 A 的最小特征值, 将仅含1和仅含0的 n 维列向量分别记作 $\mathbf{1}_N$ 和 $\mathbf{0}_N$, I_N 表示 N 阶单位矩阵, $\text{sgn}(\cdot)$ 表示符号函数, $|\cdot|$ 表示绝对值函数.

2 问题描述

如图1所示, 考虑一个在道路上行驶的包含 $N + 1$ 辆车的异质纵向编队, 每辆车可具有不同的长度和发动机时间常数. 领航车的索引号为0, 跟随车的索引号分别为1到 N . 每辆跟随者可以与邻居通信来交换状态信息(位置、速度和加速度), 假设车辆间通信固定且完善.

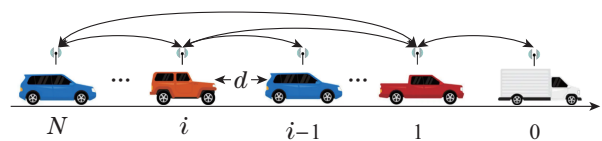


图1 车辆编队控制

Fig. 1 Vehicles platoon control

2.1 网联车辆通信拓扑

本研究基于无向通信拓扑 $\mathcal{G}_N = (\mathcal{V}_N, \mathcal{E}_N)$, 这里的 $\mathcal{V}_N = \{1, 2, \dots, N\}$ 是节点集合, $\mathcal{E}_N \subseteq \mathcal{V}_N \times \mathcal{V}_N$ 是边集合. 将某边 ε_{ij} 定义为 $\varepsilon_{ij} \triangleq (i, j) \in \mathcal{E}_N$, 表示一个从 i 节点到 j 节点的有向通信链接, 由于跟随者间的信息流是无向的, 故边 (i, j) 和边 (j, i) 等价. $A = [a_{ij}]_{N \times N}$ 表示图 \mathcal{G}_N 的邻接矩阵, 其中, $a_{ii} = 0$, 如果 $\varepsilon_{ij} \in \mathcal{E}_N$, 则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$. 如果任意一对节点间都存在一条路径, 那么图 \mathcal{G}_N 是连通的. 把 $D =$

$[d_{ij}]_{N \times |E_N|}$ 定义为关联矩阵, 当边 ε_j 离开 i 节点时, 有 $d_{ij} = -1$, 当边 ε_j 进入 i 节点时, 则有 $d_{ij} = 1$, 其余情况下 $d_{ij} = 0$. 图的拉普拉斯矩阵描述了各节点之间的指向性关系, 定义为 $L = [l_{ij}]_{N \times N}$, $l_{ii} = -\sum_{j=1, j \neq i}^N l_{ij}$. 如果 i 节点可以从 j 节点接收到信息, 那么 $l_{ij} = -1$, 在其他情况下, $l_{ij} = 0$. 注意, $L \triangleq DD^T$. 定义关于节点 i 的邻居集合

$$N_i = \{j \in \mathcal{V}_N, (i, j) \in \mathcal{E}_N\}. \quad (1)$$

定义增广有向图 $\mathcal{G}_{N+1} = (\mathcal{V}_{N+1}, \mathcal{E}_{N+1})$ 来描述 $N + 1$ 个领航者与跟随者之间的通信情况, 记节点集合 $\mathcal{V}_{N+1} = \{0, 1, 2, \dots, N\}$. 牵制矩阵 $\mathcal{P} = \text{diag}\{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ 表示领航者和跟随者之间的连接关系, 如果跟随者 i 与领航者建立连接, 则 $p_i = 1$, 否则 $p_i = 0$. 定义节点 i 的领航者可达集合为

$$P_i = \begin{cases} \emptyset, & p_i = 0, \\ \{0\}, & p_i = 1, \end{cases} \quad (2)$$

其中: \emptyset 为空集, $\{0\}$ 仅含索引号 0. 根据连接状态 p_i 的取值, P_i 可以是空集, 也可以是只包含领航者索引号的集合.

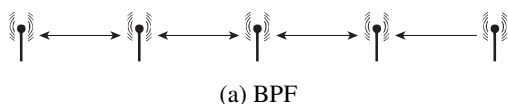
增广图 \mathcal{G}_{N+1} 的关联矩阵为 $\bar{D} = [d_{ij}]_{N \times |E_{N+1}|}$. 有 $L + \mathcal{P} \triangleq \bar{D}\bar{D}^T$ 成立. 上述符号也可以用于时变图, 其中 $\frac{\mathcal{G}_N}{\mathcal{G}_{N+1}}$, $L(t)$, $\frac{D(t)}{\bar{D}(t)}$ 和 $\mathcal{P}(t)$ 分别为无向图、拉普拉斯矩阵、关联矩阵和牵制矩阵. 在整个研究过程中做出以下假设:

假设 1 增广图 $\mathcal{G}_{N+1} = (\mathcal{V}_{N+1}, \mathcal{E}_{N+1})$ 中至少有一棵生成树是以领航者为根.

这个假设意味着在 \mathcal{G}_{N+1} 中领航者是全局可达的. 即每个跟随者都可以直接或间接地获得来自领航者的信息, 这是保证车辆队列内部稳定性的前提. 一般来说, 内部稳定性表示队列中单车闭环误差系统是渐近稳定的.

引理 1 对于任何无向连通拓扑^[16]: 具有特征向量 $\mathbf{1}_N$ 的矩阵 L , 其最小特征值 $\lambda_{\min}(L) = 0$. 此外, 如果假设 1 成立, $\lambda_{\min}(L) = 0$ 是一个单特征值, $L + \mathcal{P}$ 的所有特征值都大于 0, 也就有 $\lambda_{\min}(L + \mathcal{P}) \geq 0$.

现有的研究通常采用双向前车-跟随(bidirectional-predecessor following, BPF)通信拓扑、领导者-双向前车跟随 (leader-BPF, LBPF)通信拓扑和间隔-双向前车跟随(two BPF, TBPF) 通信拓扑结构(见图2), 均满足上述假设.



(a) BPF

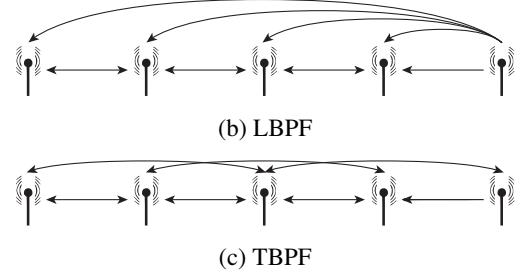


图 2 编队的LBPF, BPF和TBPF通信拓扑

Fig. 2 LBPF, BPF and TBPF communication topology of platoon

2.2 车辆纵向动力学与间距策略

考虑到路况和限速等对节油速度的影响, 基于牛顿运动定律, 建立如下单车动力学模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t), \\ m_i \dot{v}_i(t) = F_{e,i}(t) - m_i g \sin \theta_i(t) - \mu_r m_i g \cos \theta_i(t) - F_{\text{air},i}(v_i(t), d_i(t)), \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x_i(t)$ 和 $v_i(t)$ 分别为第 i 辆车的位置和速度; $a_i(t)$ 为 i 车加速度, 将会在后续章节使用; m_i 和 $F_{e,i}$ 分别是 i 车的质量和驱动力; $m_i g \sin \theta_i(t)$ 是重力沿着水平方向的分量; $\mu_r m_i g \cos \theta_i(t)$ 表示滚动摩擦力, 其中 μ_r 代表滚动摩擦系数, $\theta_i(t)$ 代表当前的道路坡度; $F_{\text{air},i}(v_i(t), d_i(t)) = \frac{1}{2} \rho c(d_i) A_i v_i^2$ 表示空气阻力, 其中: ρ 是空气密度, A_i 是车辆的横截面积, $c(d_i)$ 是空气阻力系数, 它由车距 d_i 按以下方式决定的^[17]:

$$c(d_i) = \begin{cases} c_d, & i = 0, \\ \eta_i(d_i) c_d, & i \geq 1, \end{cases} \quad (4)$$

其中: c_d 表示标准空气阻力系数, $\eta_i(d_i)$ 是空气阻力系数减小的比例.

注 1 尽管空气阻力系数因气流速度和方向、空气密度和粘度以及车辆尺寸(横截面积)的变化而随之改变, 但是对高速行驶的汽车而言影响不大, 因此, 通常可以将空气阻力系数视为常数. 当车辆间距较小时, 空气阻力可能会显著降低, 领航车也是如此. 一般来说, 对于车辆队列中的领航车, 空气阻力系数的减少可能不如跟随车明显. 据此, 假设领航车的空气阻力系数等同于单独驾驶的车辆, 忽略编队对其空气阻力减少的影响^[17], 即 $c(d_i) = c_d$.

定义每辆车的跟踪间距误差为

$$\delta_i(t) = x_i(t) - x_{i-1}(t) + d_{i,i-1}(t), \quad (5)$$

其中 $d_{i,i-1}(t) > 0$ 为 i 车和 $i - 1$ 车间的期望间距, $d_{i,i-1}(t) = x_i v_0^2(t) + r_i v_0(t) + l_i$, 式中: x_i 为速度平方系数, r_i 为速度系数, 均为正常数; l_i 为静止时的期望间距, 为确定该距离, 应考虑各车长度 L_i .

2.3 车辆编队控制目标

1) 编队中每辆车耗油量的总和最小化, 即

$$\min_{v_p^*} J = \int_0^T f_{p,v}(t) dt, \quad (6)$$

其中 $f_{p,v}$ 是本文采用的耗油率模型, 将在下一章详细介绍.

2) 车辆间距误差最小化. 定义以下优化问题:

$$\min_{x_i(t)} J(t) = \sum_{i=1}^N \delta_i^2(t), \quad (7a)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} |v_i(t) - v_0(t)| = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |\delta_i(t)| = 0, \end{cases} \quad (7b)$$

注意, 式(7a)中定义的车辆队列的价值函数是凸函数.

3) 单车闭环误差系统稳定性: 所有跟随车的速度和加速度都以有界误差跟踪领航车.

4) 队列稳定性: $|\delta_N(s)| \leq |\delta_{N-1}(s)| \leq \dots \leq |\delta_1(s)|$, 即 $G_i(s) = \frac{\delta_{i+1}(s)}{\delta_i(s)}$ 满足 $|G_i(s)| \leq 1$, 其中 $\delta_i(s)$ 是 $\delta_i(t)$ 的拉普拉斯变换形式.

注 2 为实现上述目标, 提出一种分层框架(见图3)进行轨迹优化和跟踪控制. 针对当前路况, 通过滚动时域优化策略求解出使整体最节油的规划速度 $v_p^*(t)$, 并通过无线网络传递给领航车使编队以 $v_0(t) = v_p^*(t)$ 行驶. 跟随车再针对式(7a)–(7b)中定义的分布式优化控制问题, 利用自身的位置和速度, 以及与之有通信的车辆信息, 得到一组满足式(7a)–(7b)中定义的控制目标的时变参考信号, 即参考位置 $x_i^*(t)$ 和参考速度 $v_i^*(t)$. 在跟踪控制层设计了改进型PID滑模控制器来跟踪参考信号.

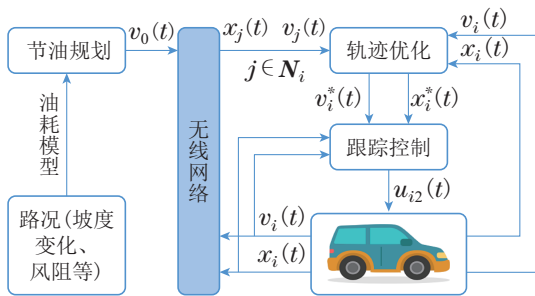


图3 车辆编队的分层控制框架

Fig. 3 Hierarchical control framework of vehicles platoon

3 节油速度轨迹规划

队列节油控制要求在行驶过程中规划出最佳速度. 本节将根据车辆编队行驶的路况, 利用滚动时域动态规划规划出满足燃油消耗–时间混合成本最小化的时变节油速度, 并将该速度赋予编队中的领航车.

3.1 油耗模型

车辆的燃油消耗取决于各种因素, 如发动机转速、传动比、扭矩、温度和效率. 为简单起见, 采用以下近似燃油消耗模型^[18–19]:

$$f_{i,v}(t) = \begin{cases} f_{\text{cruise}} + f_{\text{accel}}, & a_i \geq 0, \\ 0, & a_i < 0, \end{cases} \quad (8)$$

式中: $f_{\text{cruise}} = b_0 + b_1 v_i(t) + b_2 v_i^2(t) + b_3 v_i^3(t)$ 代表在恒定速度 $v_i(t)$ 下单位时间耗油量, $f_{\text{accel}} = \hat{a}_i(t) \times (q_0 + q_1 v_i(t) + q_2 v_i^2(t))$ 代表在恒定速度 $v_i(t)$ 下, 因具有加速度 $\hat{a}_i(t) = a_i(t) + a_\theta(t)$ 而产生的额外燃油消耗, 定义 $\hat{a}_i(t)$ 为第 i 车的等效加速度, 其中 $a_\theta(t)$ 是由道路坡度引起的等效加速度, b_0, b_1, b_2, b_3 和 q_0, q_1, q_2 是燃油消耗参数, 可以从一般车辆的发动机MAP图中获得的数据来近似计算. 由于发动机在怠速时消耗的燃油量几乎可以忽略不计^[19], 研究可忽略怠速燃油消耗.

定义编队整体位置和速度分别为 x_p 和 v_p . 对于编队速度规划问题, 本研究将所有编队车辆视为整体, 作为一般车辆来规划速度曲线. 为此, 将队列平均驱动力 $F_{e,p}$ 和平均质量 m_p 分别定义如下:

$$F_{e,p} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} F_{e,i}, \quad m_p = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} m_i,$$

式中 $F_{e,i}$ 和 m_i 分别是第 i 辆车的控制输入和质量. 队列的动力学可以写成

$$\begin{cases} \dot{x}_p(t) = v_p(t), \\ m_p \dot{v}_p(t) = F_{e,p}(t) - m_p g \sin \theta(t) - \mu_r m_p g \cos \theta(t) - F_{\text{air}}(v_p(t), d_p(t)), \end{cases} \quad (9)$$

领航车的空气阻力系数为标准空气阻力系数 c_d , 跟随车的空气阻力系数为 $c_d \eta_i(d_i(t))$, 编队整体的空气阻力系数可表示为 $c_p = c_d \sum_{i=1}^{N-1} \eta_i / N$. 相应队列油耗模型可写为

$$f_{p,v}(t) = \begin{cases} b_0 + b_1 v_p(t) + b_2 v_p^2(t) + b_3 v_p^3(t) + \hat{a}_p(t)(q_0 + q_1 v_p(t) + q_2 v_p^2(t)), & a_p \geq 0, \\ 0, & a_p < 0. \end{cases} \quad (10)$$

注 3 本文使用编队整体模型进行速度轨迹规划. 对于整个编队, 为每辆车规划出不同的参考速度将占用较高的计算成本, 不同的参考速度甚至可能会产生不安全车距和交通流不稳定等严重问题. 现有的工作表明了整体模型的合理性, 即无论是规划速度最优轨迹, 还是固定速度轨迹, 队列中所有车辆都具有相同的参考速度^[20].

3.2 滚动时域优化

滚动时域优化方法基于非线性车辆模型在离散时间范围内建立, 由燃料消耗模型、编队平均模型和滚动时域动态规划算法求解问题^[21].

每个预测区间 T 被均分为长度为 ΔT 的 H 段, 在 $k = H$ 至 $k = 1$ 之间的预测区间内进行局部优化, 并在当前滚动周期 $k = 1$ 阶段使用优化最优解, 然后, 在下一时刻重复在线滚动过程. 定义 j 为优化过程的第 j 个滚动周期, (j, k) 为第 j 个滚动周期的第 k 阶段.

将编队动力学(9)前向欧拉离散化, 即

$$\frac{v_{p,j}(k+1) - v_{p,j}(k)}{\Delta T} = \frac{1}{m_p}(-\mu_r m_p g \cos(\theta(k)) - m_p g \sin(\theta(k)) - \frac{1}{2} \rho_a A_p c_p v_p^2(k) + F_{e,p}(k)). \quad (11)$$

在滚动时域优化问题公式化过程中以 $v_{p,j}(k+1) = f(v_{p,j}(k), F_{e,p}(k))$ 表示式(11). 第 j 次滚动过程的代价函数表达式为

$$J_{p,f}^{DP}(j) = \sum_{j,k=j,1}^{j,k=j,H} f_{p,v}(k) \cdot \Delta T. \quad (12)$$

为实现该优化目标, 制定以下优化问题:

$$\min_{v_{p,j}} J_{p,f}^{DP}(j), j = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} v_{p,j}(k+1) = f(v_{p,j}(k), F_{e,p}(k)), \\ F_{e,p_{\min}} \leq F_{e,p}(j, k) \leq F_{e,p_{\max}}, \\ v_{\min}(j, k) \leq v_p(j, k) \leq v_{\max}(j, k), \\ v_{p(j,1)} = v_p(t), \\ x_{p(j,1)} = x_p(t). \end{cases}$$

在滚动过程中, $F_{e,p_{\min}} \leq F_{e,p}(j, k) \leq F_{e,p_{\max}}$ 和 $v_{\min}(j, k) \leq v_p(j, k) \leq v_{\max}(j, k)$ 分别表示发动机牵引力约束和速度约束. 在第 j 个滚动周期, 赋予位置和速度初始条件 $v_{p(j,1)} = v_p(t)$ 和 $x_{p(j,1)} = x_p(t)$. 滚动时域优化算法的伪代码如表1所示.

表 1 算法1: 节油速度滚动时域优化

Table 1 Algorithms 1: Optimization of fuel-saving speed in rolling time domain

Input: States of leader $x_0(t), v_0(t)$
Output: Optimal reference speed $v_p^*(t)$
for j in range(1, T_{total}):
for k in range($H-1, 1, -1$)
Solve pr. (14)
Reverse deduce SEQ $F_{ep,j}(k) = \{F_{ep,j}^*(h)\}_{h=1}^{h=H}$
Implement $F_{ep,j}(1) = F_{ep,j}^*(1)$
Calculate $v_{p,j}^*(k+1)$ by Eq. (11)
Update $v_0(t)$
$j = j + 1$

算法1中最小化的代价函数计算过程如下:

$$J_j(k)(x_{p,j}(k)) = \min_{v_{p,j}(k) \in V_s} \{v_k(x_{p,j}(k), F_{ep,j}(k)) + J_j(k+1)x_{p,j}(k+1)\}, \quad (14)$$

式中: $v_k(x_{p,j}(k), F_{ep,j}(k))$ 是第 j 个滚动周期中阶段 k 的增量代价, $v_k(x_{p,j}(k), F_{ep,j}(k)) = f_{p,v}(k) \cdot \Delta T$; $J_j(k+1)x_{p,j}(k+1)$ 是编队位置 $x_{p,j}(k+1)$ 至 $x_{p,j}(H)$ 的最小代价. 在每个滚动周期 j 中的第 k 阶段, 牵引力被均匀量化为有限个不重叠的子区间 F_{bit} . 定义序

列 $F_{ep,j}(k) = \{F_{ep}^1, F_{ep}^1 + F_{bit}, \dots, F_{ep_{\max}}^1\}$, 式中 F_{ep}^1 简写为序列第1项且 $F_{ep}^1 = F_{ep_{\min}}^1$. 同样地, $v_{p,j}(k) = \{v_p^1, v_p^1 + v_{bit}, \dots, v_{p_{\max}}^1\}$, 式中 $v_p^1 = v_{p_{\min}}^1$. 这些量化值将在 $v_{p,j}(k+1) = f(v_{p,j}(k), F_{e,p}(k))$ 用于所有阶段 $k = H-1, H-2, \dots, 1$ 的速度递归计算. 注意, 量化速度和牵引力需满足问题(13)的约束条件.

4 分布式轨迹优化及跟踪控制

本节使用分布式连续时间凸优化技术, 规划由领航车的位置和节油速度以及间距策略确定的参考轨迹信号, 以满足车辆间距误差最小化, 然后设计滑模跟踪控制器对轨迹信号进行跟踪控制.

4.1 车辆控制模型转换

基于模型(4), 并利用 $\dot{v}_i(t) = a_i(t)$ 可得

$$\dot{v}_i = \frac{1}{m_i}(F_{e,i} - F_{air,i}(v_i, d_i)) - g \sin \theta_i - \mu_r g \cos \theta_i. \quad (15)$$

通过对两边求导, 可得到如下等式:

$$\dot{a}_i = \frac{1}{m_i}(\dot{F}_{e,i} - m_i g \cos \theta_i + \mu_r m_i g \sin \theta_i - \frac{\rho A c_d}{m_i} v_i \dot{v}_i), \quad (16)$$

其中 $F_{e,i}(t)$ 为发动机驱动力, 其动力学可由下式表示^[20]:

$$\dot{F}_{e,i}(t) = -\frac{F_{e,i}(t)}{\varsigma_i} + \frac{c_i(t)}{\varsigma_i}, \quad (17)$$

式中: c_i 是控制输入, ς_i 是发动机时间常数. 基于式(15)–(17), 车辆动力学可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i, \\ \dot{v}_i = a_i, \\ \dot{a}_i = f_i(v_i, a_i) + g_i(v_i)c_i, \end{cases} \quad (18)$$

其中:

$$\begin{cases} f_i(v_i, a_i) = -\frac{1}{\varsigma_i}(a_i + \frac{\rho A c_d}{2m_i} v_i^2 + g \sin \theta_i + \mu_r g \cos \theta_i) - g \cos \theta_i + \mu_r g \sin \theta_i - \frac{\rho A c_d}{m_i} v_i \dot{v}_i, \\ g_i(v_i) = \frac{1}{\varsigma_i m_i}. \end{cases} \quad (19)$$

通过引入以下反馈线性化控制律, 可以将上述非线性模型进一步转化为线性模型:

$$\begin{aligned} c_i &= m_i u_{i2} + \varsigma_i \rho A c_d v_i \dot{v}_i + \varsigma_i m_i g \cos \theta_i - \\ &\varsigma_i \mu_r m_i g \sin \theta_i + \\ &\frac{\rho A c_d}{2} v_i^2 + m_i g \sin \theta_i + \mu_r m_i g \cos \theta_i, \end{aligned} \quad (20)$$

其中 u_{i2} 是要设计的附加控件输入. 故式(18)重写为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t), \\ \dot{v}_i(t) = a_i(t), \\ \dot{a}_i(t) = -\varsigma_i a_i(t) + \varsigma_i u_{i2}(t). \end{cases} \quad (21)$$

注4 由于直接驱动力控制的复杂性, 牛顿运动定律导出的模型只适用于速度规划, 不适用于控制器设计. 通过引入上述模型转换, 使控制器设计问题转化为加速度控制的问题, 易于通过油门开度实现, 使控制问题更加简化.

4.2 分布式轨迹优化

本部分将解决车辆编队轨迹优化问题. 考虑以下关于参考位置和速度的运动学方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_i^*(t) = v_i^*(t), \\ \dot{v}_i^*(t) = u_{i1}(t), \end{cases} \quad (22)$$

通过使用通信拓扑中的节点信息来设计控制输入 $u_{i1}(t)$, 使轨迹 $x_i^*(t)$ 和 $v_i^*(t)$ 是式(7a)–(7b)中定义优化问题的可行解. 记集合 $\mathbf{I}_i = \mathbf{N}_i \cup \mathbf{P}_i$, 根据集合 \mathbf{I}_i 得知领航车是否与 i 车通信. 给出轨迹优化结果:

定理1 考虑一个不确定车辆动力学的异质队列. 对于正系数 η, ι, χ 和 ξ , 如果有 $\frac{\chi}{\iota\xi} < \lambda_{\min}(L + P)$, 优化环节的控制器(23)能保证参考位置 $x_i^*(t)$ 和参考速度 $v_i^*(t)$ 是式(7a)–(7b)提出的分布式优化问题的可行解.

$$\begin{aligned} u_{i1}(t) = & - \sum_{j \in \mathbf{I}_i} (\eta(x_i(t) - x_j(t) + d_{i,j}(t)) + \\ & \iota(v_i(t) - v_j(t))) - \sum_{j \in \mathbf{I}_i} \{\tau_{ij}(t) \operatorname{sgn}(\chi(x_i(t) - \\ & x_j(t) + d_{i,j}(t)) + \\ & \xi(v_i(t) - v_j(t)))\} + \phi_i(t), \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)中的增益 $\tau_{ij}(t)$ 和内部信号 $\phi_i(t)$ 如下:

$$\begin{aligned} \dot{\tau}_{ij}(t) = & |\eta(x_i(t) - x_j(t) + d_{i,j}(t)) + \\ & \xi(v_i(t) - v_j(t))|, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \phi_i(t) = & -4(x_i(t) - x_j(t) + \\ & d_{i,j}(t)) - (v_i(t) - v_j(t)), \end{aligned} \quad (25)$$

此处 $\tau_{ij}(t) = \tau_{ji}(t) \geq 0$.

证明过程参见文献[4].

注5 在设计控制器 $u_{i1}(t)$ 中, 前两项通过局部信息反馈来解决一致性问题(7b). 引入的 $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 函数在过零时变号, 起到补偿车辆之间时变优化信号不一致的作用, 以使式(7b)成立. 由于代价函数 $J(t)$ 是时变的, 可变增益 $\tau_{ij}(t)$ 具有根据间距误差 $x_i(t) - x_j(t) + d_{i,j}(t)$ 和速度误差 $v_i(t) - v_j(t)$ 自整定的能力. 此外, 内部信号 $\phi_i(t)$ 对式(7a)中代价函数 $J(t)$ 及其变化率设置界限. 通过设计上述上层控制器解决了式(7a)–(7b)中定义的优化问题.

4.3 跟踪控制器设计

设计跟踪控制器 $u_{i2}(t)$ 跟踪参考位置 $x_i^*(t)$ 和参考

速度 $v_i^*(t)$. 通过分析滑模面上跟踪误差的动态特性, 提供改进型PID滑模控制器参数的条件, 从而使控制器的内部稳定性和队列稳定性都得到满足.

定义跟踪控制层的位置跟踪误差和速度跟踪误差为

$$\begin{cases} \tilde{x}_i(t) = x_i(t) - x_i^*(t), \\ \tilde{v}_i(t) = v_i(t) - v_i^*(t), \\ \tilde{a}_i(t) = a_i(t) - u_{i1}(t). \end{cases} \quad (26)$$

使用改进PID型滑模面 $s_i(t)$ 跟踪参考位置 $x_i^*(t)$ 和参考速度 $v_i^*(t)$,

$$s_i(t) = k_p e_i(t) + k_i \int_0^t e_i^{q/p}(\tau) d\tau + k_d \dot{e}_i(t), \quad (27)$$

这里, 跟踪误差 $e_i(t) = \tilde{x}_i(t) + \tilde{v}_i(t)$, 其中 k_p, k_i 和 k_d 是正实数, p 和 q 是互质奇数且 $q < p$.

$$\begin{cases} e_i(t) = \tilde{x}_i(t) + \tilde{v}_i(t), \\ \dot{e}_i(t) = \dot{\tilde{x}}_i(t) + \dot{\tilde{v}}_i(t) = \tilde{v}_i(t) + \tilde{a}_i(t), \\ \ddot{e}_i(t) = \dot{\tilde{v}}_i(t) + \dot{\tilde{a}}_i(t) = a_i(t) - u_{i1}(t) + \dot{a}_i(t) - \dot{u}_{i1}(t). \end{cases} \quad (28)$$

现在展示跟踪控制的结果.

定理2 如果使用如下跟踪控制器(29), 每辆跟随车辆的滑模面 $s_i(t)$ 将依趋近律 $\dot{s}_i(t)$ 收敛到零. 此时, 位置跟踪误差 $\tilde{x}_i(t)$ 和速度跟踪误差 $\tilde{v}_i(t)$ 能够在式(27)中给定的滑模控制器作用下渐近稳定于0.

$$\begin{aligned} u_{i2}(t) = & -\frac{1}{\varsigma_i} a_i(t) + a_i(t) - \frac{k_p}{\varsigma_i k_d} \dot{e}_i(t) - \\ & \frac{k_i}{\varsigma_i k_d} e_i^{q/p}(t) - \frac{K_1}{\varsigma_i k_d} s_i^\alpha(t) - \frac{K_2}{\varsigma_i k_d} s_i^\beta(t), \end{aligned} \quad (29)$$

其中: $\alpha, \beta > 0$ 且均为奇数, ς_i 由发动机时间常数确定, K_1 和 K_2 为正实数.

证 对滑模面 $s_i(t)$ 求时间导数得

$$\begin{aligned} \dot{s}_i(t) = & k_p \dot{e}_i(t) + k_i e_i^{q/p}(t) + \\ & k_d (a_i(t) - \varsigma_i a_i(t) + \varsigma_i u_{i2}(t)), \end{aligned} \quad (30)$$

将式(29)代入 $s_i(t)$ 有

$$\dot{s}_i(t) = -K_1 s_i^\alpha(t) - K_2 s_i^\beta(t), \quad (31)$$

对此, 选取李雅普诺夫函数如下:

$$V_0(t) = \frac{1}{2} s_i^2(t), \quad (32)$$

其时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_0(t) = & s_i(t) \dot{s}_i(t) = \\ & -K_1 s_i^{\alpha+1}(t) - K_2 s_i^{\beta+1}(t) \leq 0, \end{aligned} \quad (33)$$

这意味着滑模面 $s_i(t)$ 将收敛到零. 下面分析滑模面上跟踪误差 $e_i(t)$ 的动力学. 当车辆编队到达滑模面时, 有 $s_i(t) = 0$, 根据式(27)可得

$$\dot{e}_i(t) = -\frac{k_p}{k_d} e_i(t) - \frac{k_i}{k_d} \int_0^t e_i^{q/p}(\tau) d\tau. \quad (34)$$

考虑滑模面上的跟踪误差动力学, 选取的关于跟踪误差系统(28)的李雅普诺夫函数如下:

$$V_1(t) = \frac{1}{2}\dot{e}_i^2(t) + \frac{k_i p}{k_d(p+q)}e_i^{(p+q)/p}(t), \quad (35)$$

$V_1(t)$ 沿着系统(28)轨迹求取时间导数得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) &= \dot{e}_i\ddot{e}_i + \frac{k_i p}{k_d(p+q)}\frac{p+q}{p}e_i^{q/p}\dot{e}_i = \\ &\dot{e}_i\left(-\frac{k_p}{k_d}\dot{e}_i - \frac{k_i}{k_d}e_i^{q/p}\right) + \frac{k_i}{k_d}e_i^{q/p}\dot{e}_i = \\ &-\frac{k_p}{k_d}\dot{e}_i^2 \leq 0, \end{aligned} \quad (36)$$

这意味着跟踪误差 $e_i(t)$ 渐进稳定于零, 所以存在 $\tilde{x}_i(t) + \tilde{v}_i(t) \rightarrow 0$, 即 $\dot{\tilde{x}}_i(t) = \tilde{v}_i(t) = -\tilde{x}_i(t)$ 成立, 可以得出位置跟踪误差 $\tilde{x}_i(t)$ 和速度跟踪误差 $\tilde{v}_i(t)$ 指数收敛于 0. 证毕.

注 6 在改进型PID滑模跟踪控制器中, 通过积分项引入 q/p 阶次幂, 降低积分饱和, 使其在收敛速度和控制精度方面具有更好的性能. $\dot{s}_i(t)$ 为设计的趋近律, 它保证了设计控制器的收敛速度和平滑度.

4.4 队列稳定性分析

根据定理2可知跟踪误差在滑模面上是稳定的. 对于具有恒定速度的车辆队列 $u_{i1}(t) = 0$, 在队列稳定性分析中, 假设 $\tilde{x}_0(t) = 0, \tilde{v}_0(t) = 0, e_0 = 0$.

根据式(5)中定义的间距误差 $\delta_i(t)$ 可得

$$\ddot{\delta}_i(t) = \ddot{x}_i(t) - \ddot{x}_{i-1}(t) = \dot{a}_i(t) - \dot{a}_{i-1}(t), \quad (37)$$

考虑跟随车辆动力学系统中 $\dot{a}_i(t) = -\varsigma_i a_i(t) + \varsigma_i u_{i2}(t)$, 将设计的 $u_{i2}(t)$ 代入, 得

$$\dot{a}_i(t) = -a_i(t) - \frac{k_p}{k_d}\dot{e}_i(t) - \frac{k_i}{k_d}e_i^{q/p}(t), \quad (38)$$

则有关于间距误差 $\delta_i(t)$ 的如下表达形式:

$$\begin{aligned} \ddot{\delta}_i(t) &= \dot{a}_i(t) - \dot{a}_{i-1}(t) = \\ &\left(-a_i(t) - \frac{k_p}{k_d}\dot{e}_i(t) - \frac{k_i}{k_d}e_i^{q/p}(t)\right) - \\ &\left(-a_{i-1}(t) - \frac{k_p}{k_d}\dot{e}_{i-1}(t) - \frac{k_i}{k_d}e_{i-1}^{q/p}(t)\right). \end{aligned} \quad (39)$$

在跟随车跟踪误差稳定后, 有 $e_i(t) \rightarrow 0$, 滑模面 $s_i(t)$ 稳定于常数 0, 其对时间的导数 $\dot{s}_i(t) = 0$, 则有 $k_p\dot{e}_i(t) + k_i e_i^{q/p}(t) + k_d\ddot{e}_i(t) = 0$, 即

$$e_i^{q/p}(t) = -\frac{k_p}{k_i}\dot{e}_i(t) - \frac{k_d}{k_i}\ddot{e}_i(t), \quad (40)$$

那么, 式(39)可以改写为

$$\begin{aligned} \ddot{\delta}_i(t) &= -(a_i(t) - a_{i-1}(t)) - \frac{k_p}{k_d}(\dot{e}_i(t) - \dot{e}_{i-1}(t)) + \\ &\frac{k_p}{k_d}(e_i(t) - e_{i-1}(t)) + \ddot{e}_i(t) - \ddot{e}_{i-1}(t), \end{aligned} \quad (41)$$

考虑将式(41)转化为常微分方程, 需要将其中的自变

量转换为 $\delta_i(t)$ 或 $\dot{\delta}_i(t)$ 的各阶导数形式.

$$\begin{aligned} \ddot{\delta}_i(t) &= -\ddot{\delta}_i(t) - \frac{k_p}{k_d}(\dot{\delta}_i(t) + \ddot{\delta}_i(t) - \dot{d}_{i,i-1}(t) - \\ &\ddot{d}_{i,i-1}(t)) + \frac{k_p}{k_d}(\delta_i(t) + \dot{\delta}_i(t) - \\ &d_{i,i-1}(t) - \dot{d}_{i,i-1}(t)) + \ddot{\delta}_i(t) + \ddot{\delta}_i(t) - \\ &\ddot{d}_{i,i-1}(t) - \ddot{d}_{i,i-1}(t), \end{aligned} \quad (42)$$

化简得

$$\ddot{\delta}_i(t) - \delta_i(t) = \ddot{d}(t) - d(t) - \frac{k_d}{k_p}\ddot{d}(t) - \frac{k_d}{k_p}\ddot{d}(t),$$

对微分方程进行拉氏变换, 得

$$\begin{aligned} \delta_i(s) &= \frac{1}{s^2 - 1}\left(-\frac{k_p}{k_d} \cdot s^3 d_{i,i-1}(s) + \right. \\ &\left. \left(1 - \frac{k_p}{k_d}\right) \cdot s^2 d_{i,i-1}(s) - d_{i,i-1}(s)\right), \end{aligned}$$

则 $G_i(s) = \frac{\delta_{i+1}(s)}{\delta_i(s)}$ 的值为

$$\begin{aligned} &\frac{-\frac{k_p}{k_d} \cdot s^3 d_{i+1,i}(s) + \left(1 - \frac{k_p}{k_d}\right) \cdot s^2 d_{i+1,i}(s) - d_{i+1,i}(s)}{-\frac{k_p}{k_d} \cdot s^3 d_{i,i-1}(s) + \left(1 - \frac{k_p}{k_d}\right) \cdot s^2 d_{i,i-1}(s) - d_{i,i-1}(s)}, \\ &i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned}$$

当车辆达成内部稳定后, 根据本文设计的间距策略, 编队中车辆车距相等且由领航车速度 v_0 确定, 此时有 $d_{i,i-1}(s) = d_{i+1,i}(s)$, 则 $G_i(s) = 1$, 根据文献[11]易得, 使用本文提出的改进型PID滑模控制器的编队满足队列稳定性.

5 仿真实验

本节从节油和跟踪控制效果两方面展示提出的网联车辆编队优化控制方法的有效性. 考虑一个由5辆网联车辆组成的编队, 领航车序号为0, 跟随车序号为1到4, 车辆参数如表2所示, 路况相关参数为滚动摩擦系数 $\mu_r = 2.8 \times 10^{-3}$, 车辆迎风横截面积 $A_p = 2 \text{ m}^2$, 空气密度为 $\rho_a = 1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 标准空气阻力系数为 $c_p = 0.3$.

表 2 车辆参数

Table 2 Vehicles' parameters

车辆索引号	ς_i/s	L_i/m	m_i/kg
0	0.50	5.0	1850
1	0.50	5.0	1850
2	0.35	4.6	2200
3	0.60	4.9	2500
4	0.60	4.7	2500

5.1 节油性能

与文献[4]中无节油速度优化的车辆编队耗油量做比较实验. 考虑一段限速区间为[20, 25] m/s的封闭

公路,如图4所示,道路包含水平和坡度为3%的上、下坡路段.

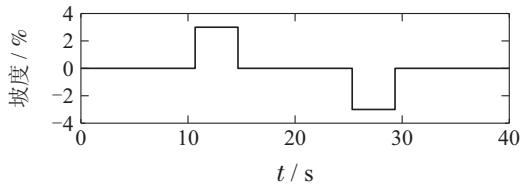


图4 仿真中模拟的路况

Fig. 4 Road conditions assumed in the simulation

针对行驶的路况,使用本方法进行节油速度规划(见图5).文献[4]固定的编队速度为一正常数,与规划速度的初值相同.根据油耗模型,计算并比较使用规划速度和使用固定速度的车辆油耗,节油性能见图6和表3.油耗模型中使用的参数为 $[b_0, \dots, b_3] = [0.1569, 2.450 \times 10^{-2}, -7.415 \times 10^{-4}, 5.975 \times 10^{-5}]$, $[q_0, \dots, q_2] = [0.07224, 9.681 \times 10^{-2}, 1.075 \times 10^{-5}]$.

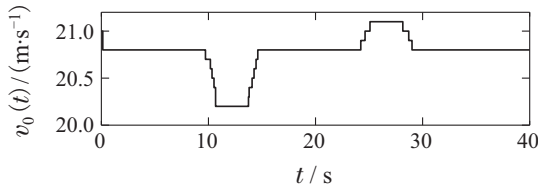


图5 使用本文方法规划的编队速度

Fig. 5 Platoon's velocity planned by our method

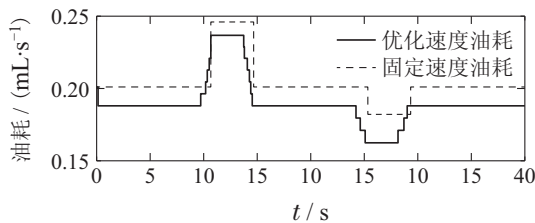


图6 瞬时油耗

Fig. 6 Instantaneous fuel consumption

通过图6和表3可以看出,使用规划速度较使用固定速度节约6.2%,如果在编队规模和载重量扩大或固定速度不合理的情况下,节油效果将更显著.此外,领航车最邻近的跟随车相较于领航车节油效果明显,体现了编队的燃油经济性;3车和4车的油耗和节油效果大致相同,车辆相对位置的差别并未使节油效果明显下降,编队整体速度规划是合理的.

表3 车辆耗油量

Table 3 Vehicles' fuel consumption

车辆索引	规划速度耗油量/mL	文献[4]固定速度耗油量/mL
0	223.45	237.49
1	196.29	209.56
2	235.06	250.68
3	262.08	279.54
4	262.14	279.67

5.2 编队分布式控制效果

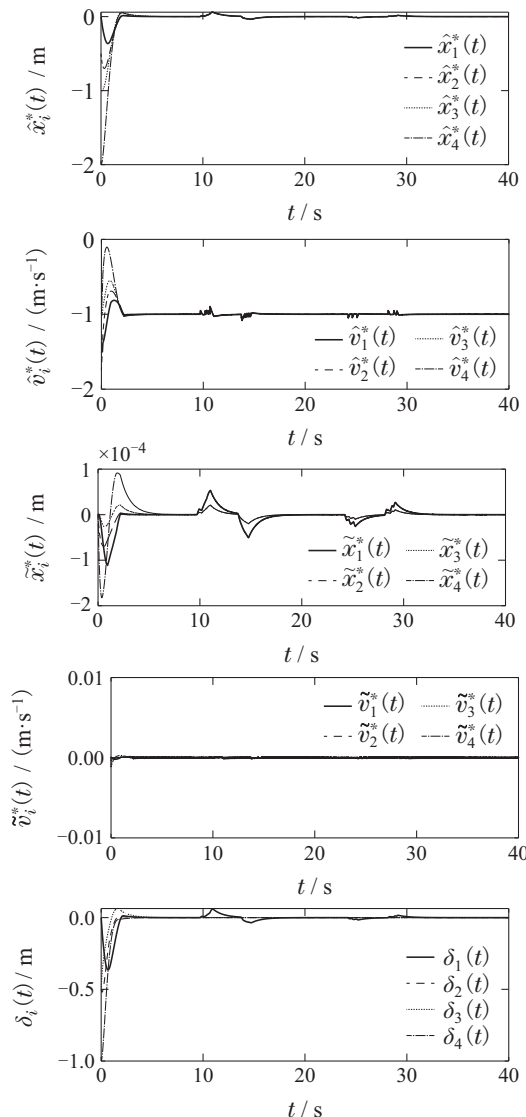
编队初始位置 $x(0)=[0, -5, -10.5, -16, -22]$ m, 间距误差初值不为零.领航车采用规划所得的速度,各跟随车存在 $[-2, 2]$ m/s的初始速度误差.根据定理1和定理2,选择控制器 $u_{i1}(t)$ 和跟踪控制器 $u_{i2}(t)$ 的参数(见表4).下面给出编队在LBPF拓扑下的轨迹优化和跟踪控制结果.图7展示了使用所提方法所有车辆的参考位置和速度误差、位置和速度跟踪误差、间距误差和速度误差.车辆的实时位置如图8所示.结果表明,单车的闭环误差系统稳定性和队列稳定性被很好的保证.

表4 提出的控制框架中使用的参数值

Table 4 Parameter values used in the proposed control framework

参数	η	ι	τ	χ	p
取值	0.5	0.5	0.5	0.5	5

参数	q	α	β	K_1	K_2
取值	3	5	7	5	40



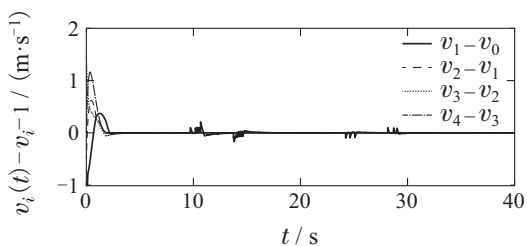


图 7 LBPf拓扑下本控制框架的编队控制效果: 参考轨迹误差 \hat{x}_i^* 和 \hat{v}_i^* ; 跟踪误差 \tilde{x}_i^* 和 \tilde{v}_i^* ; 间距误差 δ_i^* 和速度误差 $v_i - v_{i-1}$

Fig. 7 Control Performance of LBPf communication topology platoon under the control of this method: Reference trajectory errors \hat{x}_i^* and \hat{v}_i^* , tracking errors \tilde{x}_i^* and \tilde{v}_i^* , spacing errors δ_i^* and velocity errors $v_i - v_{i-1}$

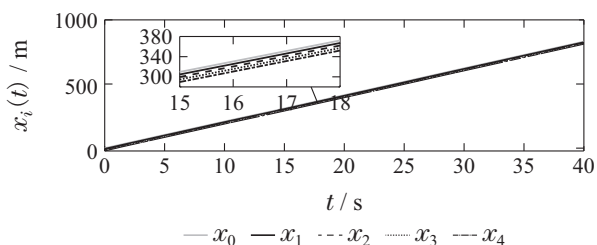


图 8 本文方法控制车辆的实时位置

Fig. 8 Platoon position controlled by our method

为衡量车辆编队的控制性能, 基于以下的性能度量标准, 将本文提出的方法与文献[11]中的基准PID控制方法进行比较, 即

$$\begin{cases} J_1(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T \sum_{i=1}^4 \tilde{x}_i^2(t) dt, \\ J_2(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T \sum_{i=1}^4 \delta_i^2(t) dt, \end{cases} \quad (43)$$

式中: $J_1(t)$ 为整体间距误差, $J_2(t)$ 为跟踪性能。

图9-11分别为LBPf通信下编队的实时速度、间距误差和速度误差比较. 结果表明, 采用本文的控制方法的异质车辆编队间距误差和速度误差较小, 收敛较快, 且曲线较平和, 未出现明显抖振现象. 相应的衡量指标见表5, 从中可以验证上述结论, 即本文的两级分层控制框架显著的减小了 $J_1(t)$, $J_2(t)$ 的数值, 具有明显的优化作用和防抖振效果.

表 5 LBPf通信拓扑下不同控制器性能比较

Table 5 Performance comparison of different controllers in LBPf communication topology

控制器	$J_1(t)$	$J_2(t)$	调节时间/s
本文	2.982	5.379×10^{-7}	3.165
文献[11]	6.723	—	18.593

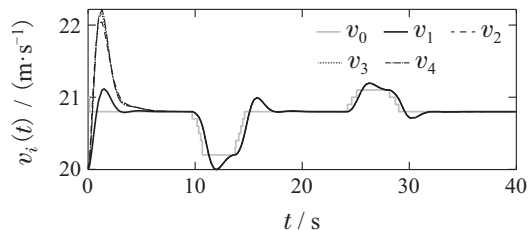
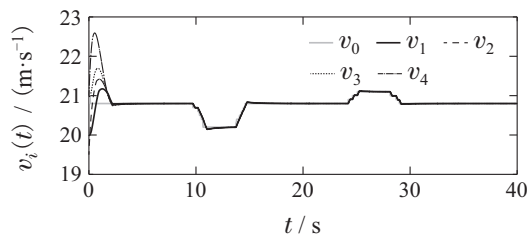


图 9 本文方法(上)与文献[11]方法(下)车辆速度 v_i 的比较
Fig. 9 Comparison of vehicles' velocity v_i between the method in this paper (above) and paper [11] (below)

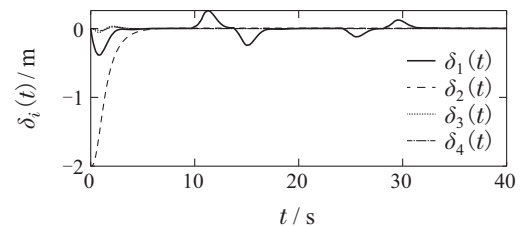
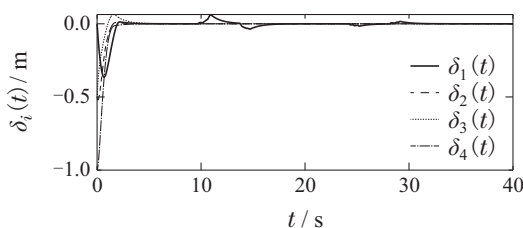


图 10 本文方法(上)与文献[11]方法(下)间距误差 $\delta_i(t)$ 的比较
Fig. 10 Comparison of spacing errors $\delta_i(t)$ between the method in this paper (above) and reference [11] (below)

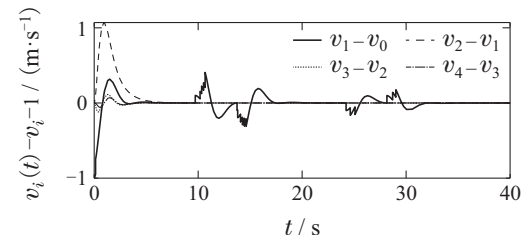
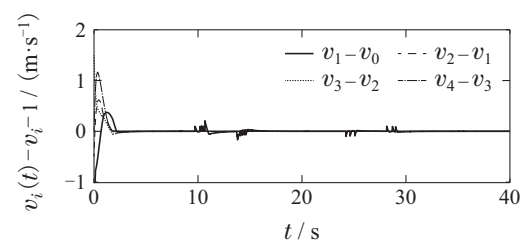


图 11 本文方法(上)与文献[11]方法(下)速度误差 $v_i - v_{i-1}$ 的比较
Fig. 11 Comparison of velocity errors $v_i - v_{i-1}$ between the method in this paper (above) and reference [11] (below)

6 结语

本文引入了速度规划-分层控制框架,实现了优化和控制的解耦.基于滚动时域动态规划和分布式连续时间优化技术,为所有跟随车求解出节油和紧凑的最优速度轨迹.然后,设计了改进型的PID滑模控制器,跟踪最优参考信号,提高了速度调节的灵活性.该方法可以实现网联车辆编队的节油和紧凑控制,在收敛速度和控制精度方面具有更好的性能,使编队具有单车闭环误差系统和队列的稳定性.

本文的最优节油速度是在离散空间求解的,经线性化变换后传递给车辆,并基于线性动力学模型进行控制,当前寻求一种非线性车辆动力学的直接跟踪控制方法具有重要研究意义.此外,考虑通信存在时延、丢包、量化等问题进行网联车辆控制方面的研究也具有重要的实际应用意义.

参考文献:

- [1] YU Lingli, KUANG Zongxu, WANG Zhengjiu, et al. Intelligent vehicle platoon lateral and longitudinal control based on finite-time sliding mode control. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(8): 1299 – 1312.
(余伶俐, 况宗旭, 王正久, 等. 智能车辆队列横纵向有限时间滑模控制. *控制理论与应用*, 2021, 38(8): 1299 – 1312.)
- [2] LUO Jie, LU Liangye, HE Defeng, et al. Distributed model predictive control of vehicle platoons with switching communication topologies. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(7): 887 – 896.
(罗捷, 鲁良叶, 何德峰, 等. 通信拓扑切换下车辆队列分布式模型预测控制. *控制理论与应用*, 2021, 38(7): 887 – 896.)
- [3] GUO G, WANG Q. Fuel-efficient en route speed planning and tracking control of truck platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 20(8): 3091 – 3103.
- [4] GUO G, YANG D, ZHANG R. Distributed trajectory optimization and platooning of vehicles to guarantee smooth traffic flow. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2022, DOI: 10.1109/TIV.2022.3179293.
- [5] RIOS-TORRES J, MALIKOPOULOS A A. A survey on the coordination of connected and automated vehicles at intersections and merging at highway on-ramps. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 18(5): 1066 – 1077.
- [6] ZHENG Y, LI S E, WANG J, et al. Stability and scalability of homogeneous vehicular platoon: Study on the influence of information flow topologies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 17(1): 14 – 26.
- [7] LIU D, BESSELINK B, BALDI S, et al. On structural and safety properties of Head-to-Tail string stability in mixed platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, DOI: 10.1109/TITS.2022.3151929.
- [8] RODONYI G. An adaptive spacing policy guaranteeing string stability in multi-brand ad hoc platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 19(6): 1902 – 1912.
- [9] GUO G, LI P, HAO L Y. A new quadratic spacing policy and adaptive fault-tolerant platooning with actuator saturation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(2): 1200 – 1212.
- [10] WEN S, GUO G. Distributed trajectory optimization and sliding mode control of heterogeneous vehicular platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(7): 7096 – 7111.
- [11] SUNGU H E, INOUE M, IMURA J. Nonlinear spacing policy based vehicle platoon control for local string stability and global traffic flow stability. *2015 European Control Conference (ECC)*. Linz, Austria: IEEE, 2015: 3396 – 3401.
- [12] HUSSEIN A A, RAKHA H A. Vehicle platooning impact on drag coefficients and energy/fuel saving implications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 71(2): 1199 – 1208.
- [13] GOEKE D, SCHNEIDER M. Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research*, 2015, 245(1): 81 – 99.
- [14] LI S E, GUO Q, XIN L, et al. Fuel-saving servo-loop control for an adaptive cruise control system of road vehicles with step-gear transmission. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 66(3): 2033 – 2043.
- [15] XU S, PENG H. Design and comparison of fuel-saving speed planning algorithms for automated vehicles. *IEEE Access*, 2018, DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2805883.
- [16] LIBERZON D. *Switching in Systems and Control*. Boston: Birkhauser, 2003.
- [17] ALAM A. *Fuel-efficient heavy-duty vehicle platooning*. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2014.
- [18] TURRI V, BESSELINK B, JOHANSSON K H. Cooperative look-ahead control for fuel-efficient and safe heavy-duty vehicle platooning. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 25(1): 12 – 28.
- [19] KAMAL M A S, MUKAI M, MURATA J, et al. Ecological vehicle control on roads with up-down slopes. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(3): 783 – 794.
- [20] DUNBAR W B, MURRAY R M. Distributed receding horizon control for multi-vehicle formation stabilization. *Automatica*, 2006, 42(4): 549 – 558.
- [21] WANG Qiong, GUO Ge. Platoon speed receding horizon dynamic programming and nonlinear control. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(5): 888 – 896.
(王琼, 郭戈. 车队速度滚动时域动态规划及非线性控制. *自动化学报*, 2019, 45(5): 888 – 896.)

作者简介:

杨冬琪 硕士, 工程师, 目前研究方向为分布式控制和智能交通系统, E-mail: ydq97@qq.com;

段洪君 硕士生导师, 副教授, 研究方向为复杂系统建模优化与控制、电机系统及其智能控制, E-mail: dhjday@126.com;

郭戈 博士生导师, 教授, 从事网络控制、智能交通控制、智能载体控制研究, E-mail: geguo@yeah.net;

张忍永康 博士研究生, 目前研究方向为分布式优化与控制、智能交通系统等, E-mail: zryk1998@163.com.