

基于运输成本的高速公路车辆协同调度与速度规划

卢自宝^{1,2†}, 田凯健^{1,2}, 方明星^{1,2}, 曲立国¹

(1. 安徽师范大学 物理与电子信息学院, 安徽 芜湖 241000;

2. 安徽省智能机器人信息融合与控制工程实验室, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 本文针对路网中大规模的货运车辆, 给出一种新的综合油耗成本和时间成本的车辆协同调度方案. 该方案能够在最大化节约运输成本的前提下解决车队的协调优化问题. 首先, 建立基于油耗成本和时间成本的车辆运输成本模型, 通过微调部分车辆的速度与路径, 循环计算任意两辆车组队行驶的运输成本节约率, 将符合组队条件的车辆构造为车辆组队协调图. 然后采用一种基于中心聚类划分的算法将车辆的组队问题转化为聚类求解问题, 求解出节约运输成本最大化的领头车, 使其在公共路段组成车队行驶. 最后, 考虑道路坡度及速度限制等条件, 采用基于空间采样的动态规划方法对合并车辆的速度进行优化, 从而进一步降低车辆的运输成本. 仿真结果验证了本文提出的优化方案及求解思路的可行性和有效性.

关键词: 智能网联车辆; 车辆协同调度; 运输成本; 聚类算法; 速度规划

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1797

Cooperative Scheduling and Speed Planning of Vehicles on Highways Based on Transportation Cost

LU Zi-bao^{1,2†}, TIAN Kai-jian^{1,2}, FANG Ming-xing^{1,2}, QU Li-guo¹

(1. College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China; 2. Anhui Provincial Engineering Laboratory on Information Fusion and Control of Intelligent Robot, Wuhu 241000, China)

Abstract: This paper presents a new cooperative scheduling scheme for large-scale freight vehicles in the road network, which combines fuel consumption cost and time cost. This scheme can solve the problem of vehicle platoon coordination optimization while maximizing transportation cost saving. Firstly, a vehicle transportation cost model based on fuel consumption cost and time cost is established, the transportation cost saving rate of any two vehicles traveling in a group is calculated cyclically by fine-tuning the speed and path of some vehicles, and the vehicles meeting the conditions of the group are constructed as the vehicle group coordination graph. Then, an algorithm based on central clustering division is used to transform the problem of vehicle formation into a cluster solution problem, and the lead vehicle with the maximum transportation cost saving is solved, so that it can form a platoon to drive in public sections. Finally, considering the road slope and speed limit, a dynamic programming method based on spatial sampling is adopted to optimize the speed of the merged vehicles, so as to further reduce the transportation cost of vehicles. Simulation results verify the feasibility and effectiveness of the proposed optimization scheme and solution idea.

Keywords: intelligent connected vehicles; vehicle cooperative scheduling; transportation cost; clustering algorithm; speed planning

0 引言

交通运输是重要碳排放源之一, 汽车尾气排放已成为我国城市污染的主要来源^[1]. 根据世界银行的一项预测, 由于世界经济的不断发展, 到 2050 年道路货运量将比 2010 年增长约 90%^[2], 这将导致能源消

耗和温室气体排放的进一步加重, 不利于我国经济的可持续发展. 《中国制造 2025》做出了明确的发展规划来限制温室气体排放, 同时化石燃料价格的走高也将导致货物运输成本的增加, 因此, 货物运输行业迫切需要提高货车整体的能源利用率^[3-4].

目前迫切需要一种智能化层面的货运解决方案,

收稿日期: 2021-10-19; 录用日期: 2022-02-25.

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (2008085MF199).

†通讯作者. E-mail: luzibao@163.com.

以减轻负面影响,提高交通效率.解决这一问题的潜在方法是将具有公共路径的车辆组成车队以自适应巡航的形式行驶^[5].现代信息和通信技术使网联环境下的多车协同经济性行驶成为可能,车对车和车对基础设施通信的使用以及先进的计算机技术使大规模车辆的实时协调和自动控制成为可能^[6].得益于通信技术和计算机技术的发展,越来越多的先进控制技术应用于多车协同控制,例如,文献[7]将非线性模型预测控制方法应用于互联车辆的协同控制,以提高运输行业的安全性和能源利用率;文献[8]采用强化学习的方法解决了自动车辆在多车道交通中的匝道合并问题.特别地,由于货运车辆的外形、质量和体积等原因,密集排列的重型车辆组队行驶可以减少空气阻力同时减少燃油消耗.尤其是在高速行驶情况下,空气阻力占比能够达到整车所受总阻力一半甚至以上^[9].

货运车辆可以通过编队技术减小车间距离,使跟随车进入领航车的尾流区,降低跟随车的空气阻力,从而降低队列的燃油消耗^[10].相关研究表明,通过货车队列在高速公路上行驶可以节省约10%的燃油消耗^[11].因此,在车辆独立长途运输的当下,队列技术为道路货运行业的长远发展提供了有力保障.文献[12]提出了高速公路货车队列行驶非线性时域滚动优化控制策略,保证卡车队列行驶时车间距离的安全性及有效性.文献[13]基于LPF通信拓扑结构和固定间距策略,考虑协作式车队机动过程中存在燃油或制动延时的情况,综合多种因素提出了协作车队纵向控制策略.由于道路坡度及速度限制等条件均是空间依赖型,文献[14]基于空间采样的方法研究了高速公路上车辆队列的速度规划与跟踪控制问题,给出了基于燃油-时间成本和空间采样相结合的平均车辆速度滚动动态规划算法.

随着我国基础设施的不断建设和完善,各类经济活动对于交通运输的要求也变得更高,考虑时间因素的运输问题也变得越来越高,文献[15]建立了一种带时间窗约束的多需求车辆路径问题的数学模型,给出了求解模型的联合优化遗传算法.文献[16]考虑了偏离计划时间的惩罚成本,研究了行驶时间的不确定性和调度差对车队节油效果的影响.现代通信基础设施可以将货运车辆的实时位置、速度和分配信息与交通数据等外部影响融合在一起,通过协调车辆的时间和路线实现区域内车辆的集中协调组队.文献[17]通过使用分布式控制器网络来协调组队以最大限度地节省燃油.将虚拟控制器安

装在路网的主要路口协调接近车辆的速度,使它们能够同时到达十字路口,从而进行组队.在此基础上,文献[18]提出一种协调算法将多辆分散的车辆组成队列形式,并对相邻的车辆进行成对的协调.文献[19]提出一种基于交通信息物理系统的大规模车辆协同调度方案,通过微调部分或全部车辆的速度与路径,使其在某些公共路段组成车队共同行驶,从而节约车辆运输过程中的燃油消耗.

上述文献虽然以降低油耗为目的提出多种车辆组队方法,但并没有考虑运输车辆的时间成本以及车队的速度规划问题.为此,本文首先建立基于油耗成本和时间成本的车辆运输成本模型,对路网中的运输车辆进行合并可行性的判断,构造车辆组队协调图,得到可编队车辆集合.然后采用一种基于中心聚类划分的领航车选择算法,从可编队车辆集合中选择出最大化节约车队运输成本的领航车,并完成车队的匹配划分.最后,考虑道路坡度及速度限制等条件,采用基于空间采样的动态规划方法对合并车队的速度进行优化,从而规划出最小运输成本的车辆组队、路径规划和速度优化方案.

需要注意的是本文通过改变部分车辆的原始速度和路径,促使更多的车辆能够在公共路段合并成车队行驶,从而节约运输成本.但在车辆改变原始速度和路径的过程中,如果路网中的车辆数量非常庞大,整体的公共路径的规划将非常困难,很难通过计算获得最优解.为此,需要根据路网条件将众多车辆合并成多个车队并从中筛选出领航车.

1 问题描述

1.1 货车运输任务的描述

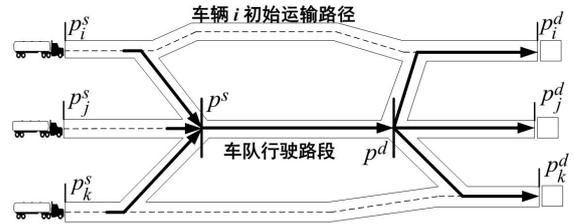


图1 货车合并示意图

用图 $G = (M^+, E)$ 描述路网, $M^+ = \{1, \dots, M\}$ 为路段相交节点的集合, $\omega(i, j)$ 表示节点 i 与节点 j 之间的路段, 则 $E = \{\omega(i, j) | i, j \in M^+, i \neq j\}$ 为路段的集合. 设 $l(i, j)$ 为路段 $\omega(i, j)$ 的长度, 若节点 i 与 j 之间没有路段相连则 $l(i, j) = +\infty$. 假设在已知范围内的路网中包含 N 辆异质运输货车, 每辆运输货车在出发前, 都安排有相应的运输任务, 车辆 $i, i = 1, \dots, N$ 的运输任务由它的出发地 p_i^s 、目的地 p_i^d 、运输起始时间 t_i^s 、运输结束时间 t_i^d 四部分

组成. 假设每辆货车的运输任务都有对应的路线, 一般可概括为以下四种情况: 1. 出发地相同, 目的地不同; 2. 出发地相同, 目的地相同; 3. 出发地不同, 目的地相同; 4. 出发地不同, 目的地不同.

在实际运输过程中, 货车基本都是单独行驶. 如果货车能够保持较小的车间距, 在共同路段以车队的方式行驶, 就能显著减少跟随车的空气阻力, 从而减少跟随车的燃料消耗, 降低运输成本. 同时多车的智能编队在兼顾道路交通安全的前提下, 能充分利用道路容量、提高交通运输效率, 因此, 研究车队模式在节油方面的潜力具有重要的理论和实际意义. 图 1 为货车的合并行驶路径示意图, 独立行程时, 每辆车都有自己的初始运输路径, 改变部分车辆的运输路径可以使车辆合并为车队形式. 如图 1 所示, 行驶过程可划分为三个阶段, 货车单独行驶路段 (p_i^s, \tilde{p}^s)、车队行驶路段 (\tilde{p}^s, \tilde{p}^d) 和从车队分离单独行驶路段 (\tilde{p}^d, p_i^d), 其中 \tilde{p}^s 为共同路段的起点, \tilde{p}^d 为共同路段的终点. 需要注意的是针对上述货车的四种运输情况, 并不是所有的货车在合并时都包含上述三个阶段, 因此图 1 仅是对本调度策略的一个简单表示.

1.2 车辆简易运输成本模型

由于发动机的速度, 传动比, 扭矩, 温度和效率等因素都可以对运输货车的油耗产生影响, 考虑这些因素将会使得油耗模型复杂化, 为了更加简易的分析车辆合并行驶的经济性相关问题, 本节采用基于速度每单位距离的油耗模型. 当车辆以车队形式行驶时, 认为车队中的所有车辆拥有相同的速度, 每个车队包括一辆领航车及多辆跟随车, 且只有跟随车辆能够节约能耗. 本文并不注重单辆车的真实油耗, 而是研究车辆合并行驶时风阻的减小导致的燃油经济性. 基于速度每单位距离的油耗模型^[20]:

$$f_{e,i}(v_i) = \begin{cases} F_1 v_i + F_0, & i = 1 \\ F_{p,1} v_i + F_{p,0}, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

理论上认为该模型在速度区间 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 内与实际油耗相近. 其中, $i = 1$ 表示为领航货车或者货车单独行驶, 其它则表示为车队中跟随行驶的货车. $F_1, F_0, F_{p,1}$ 和 $F_{p,0}$ 为常数. 如图 1 所示, 设定车辆 i 的初始运输路径序列为 $r_i = (p_i[1], p_i[2], \dots, p_i[d_i])$, 对应的路段长度为 $l_i = (l_i[1], l_i[2], \dots, l_i[d_i])$, 其中, d_i 表示车辆 i 初始运输路径的路段数, $l_i[k]$ 为对应路段 $p_i[k]$ 的长度, $k = 1, \dots, d_i$. 实际中, 车辆速度在任意时刻都可改变, 本文假设车速仅在重新调度或路况突变时发生改变, 其余情况保持匀速行驶, 则其相应地速度序列为 $v_i = (v_i[1], v_i[2], \dots, v_i[d_i])$, 对应

的货车时间序列为 $t_i = (t_i[1], t_i[2], \dots, t_i[d_i + 1])$, 则 $t_i[1] = t_i^s, t_i[d_i + 1] = t_i^d$ 即速度 $v_i[k]$ 在区间 $(t[k], t[k + 1])$, 保持不变.

采用上述油耗模型, 则车辆 i 从出发地到目的地的油耗成本可表示为:

$$J_{f,i} = \vartheta_1 \sum_{h=1}^{d_i} l_i[h] f_{e,i}(v_i[h]) \quad (2)$$

车辆 i 的时间成本可表示为:

$$J_{t,i} = \vartheta_2 \sum_{h=1}^{d_i} \frac{l_i[h]}{v_i[h]} \quad (3)$$

其中 ϑ_1 和 ϑ_2 分别表示对应成本的单价. 货车行驶成本需要权衡运输时间和燃油消耗. 则定义货车 i 的运输成本函数为油耗成本和时间成本的加权代数和:

$$J_i = \alpha J_{f,i} + \beta J_{t,i} \quad (4)$$

其中, $\alpha > 0$ 和 $\beta > 0$ 为权重系数且满足 $\alpha + \beta = 1$, 用于调整油耗成本和时间成本的比重, 确保二者之间的平衡. 在实际应用中, 可以根据货物运输的整体成本要求改变 α 和 β 的数值. 从上式可以看出, 成本函数包含两项: 第一项是油耗成本, 由系数 α 调整其比重; 第二项是时间成本, 由权重系数 β 调整其比重. 当 $\alpha = 0$ 时, 运输成本函数变为时间成本函数, 只需最短的时间内到达目的地即可无需考虑油耗问题, 相反, 当 $\beta = 0$ 时, 运输成本函数变为油耗成本函数, 此时不需要考虑时间成本只要最省油即可, 通过对成本函数进行优化, 可以实现油耗成本和时间成本的权衡.

2 车辆合并策略

每辆货车在出发时都规划有包括车辆编号, 路径序列, 车辆速度等车辆信息的初始运输任务, 这些任务被存储在路网系统的数据库中, 构成一个任务集合 Φ_K . 通过中央处理器对初始任务集合进行分析和计算, 如果货车之间没有公共路径, 通过微调部分车辆的速度与路径, 然后根据下文的合并可行性判断式 (8)-(11) 分析编队可行性, 从而规划出具有公共路径的运输任务序列. 将得出的规划后的运输任务发送回路网中的货车, 以此来进行相应的合并规划.

如图 1 所示, 设重新规划出的运输路径序列为 $\tilde{r}_i = (p_i[1], \dots, p_i[n_i], \tilde{p}[1], \dots, \tilde{p}[d], p_i[n_i + d + 1], \dots, p_i[n_i + d + m_i])$, 其中, n_i, d 和 m_i 分别为路径规划后车辆 i 单独行驶的路段数, 组队行驶的路段数, 分离行驶的路段数. 因此, 合并规划后, 车辆 i 从出发地到

目的地的油耗成本可表示为:

$$\begin{aligned} \bar{J}_{f,i} = & \vartheta_1 \left(\sum_{h=1}^{n_i} l_i[h] f_{e,i}(v_i[h]) + \sum_{h=n_i+1}^{n_i+d} l_i[h] f_{e,i}(v_i[h]) \right. \\ & \left. + \sum_{h=n_i+d+1}^{n_i+d+m_i} l_i[h] f_{e,i}(v_i[h]) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)由路径规划后车辆单独行驶油耗成本、组队行驶油耗成本以及分离后行驶油耗成本三部分组成. 其中, $p_i[n_i+1] = \bar{p}[1]$, 代表公共路段的起始路段; $p_i[n_i+d] = \bar{p}[d]$ 代表公共路段末尾路段.

车辆从出发地到目的地的时间成本为:

$$\bar{J}_{t,i} = \vartheta_2 \sum_{h=1}^{n_i+d+m_i} \frac{l_i[h]}{v_i[h]} \quad (6)$$

合并规划后的运输成本可以表示为:

$$\bar{J}_i = \alpha \bar{J}_{f,i} + \beta \bar{J}_{t,i} \quad (7)$$

为了便于分析, 本文认为车辆在公共路段起始处合并已完成, 合并决策可以立即执行.

2.1 车辆合并的可行性

首先明确并不是路网中的任意两辆车都能够合并行驶, 需要从时间角度和运输成本角度分析车辆调度后能否满足运输任务的需求. 为了简化分析本节将车辆的初始运输方案与调度方案结合, 即两辆车合并后默认以领航车的初始路径行驶. 车辆 i 和 $j, i, j = 1, \dots, N$, 的时间合并可行性条件为:

$$\begin{cases} t_i^s + \frac{\sum_{h=1}^{n_i+d+m_i} l_i[h]}{v_{i \max}} < t_i^d \\ t_j^s + \frac{\sum_{h=1}^{n_j+d+m_j} l_j[h]}{v_{j \max}} < t_j^d \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{\sum_{h=1}^{n_i} l_i[h]}{(1-\gamma)v_{i \max} + \gamma v_{i \min}} \leq \frac{\sum_{h=1}^{n_j} l_j[h]}{(1-\gamma)v_{j \min} + \gamma v_{j \max}} \quad (9)$$

其中, $v_{i \max}$ 和 $v_{i \min}$ 为车辆 i 可行驶的最大速度和最小速度. 式(8)表示车辆在准时到达的前提下的可选择路径. 式(9)表示车辆能够在公共路段起始处完成合并行驶, 当车辆 i 到共同路段的距离大于车辆 j 时, $\gamma = 0$, 否则, $\gamma = 1$.

考虑任意两辆可编队的货车 i 和货车 j , 假设 j 为领航货车, i 跟随其行驶, 则货车 i 节省的运输成本为:

$$\Delta J_i(i, j) = J_i - \bar{J}_i(i, j) \quad (10)$$

其中, J_i 为路径规划前货车 i 路的运输成本, $\bar{J}_i(i, j)$ 为货车 i 跟随领航车 j 时的运输成本. 定义运输成本

节约率为:

$$k_i(i, j) = \frac{\Delta J_i(i, j)}{J_i} \quad (11)$$

货车 i 运输成本节约率 $k_i(i, j)$ 是判断合并可行性的依据, 当 $k_i(i, j) > 0$ 时, 可以合并, 否则不能合并. 循环计算每辆车作为领航车辆的运输成本节约率 $k_i(i, j)$, 结合时间合并可行性条件可以得到可合并行驶的车辆集合 Φ_v . 以集合 Φ_v 中的车辆作为节点, $k_i(i, j)$ 作为连接权重, 可以得到如图2所示的车辆协调图. 图2为有向加权图, 用图 $\bar{G} = (\Phi_v, V)$ 表示, 其中 V 为连接两个节点的边的集合. 若货车之间不满足合并车队行驶的条件, 即两个节点之间的权重 $k_i(i, j) \leq 0$, 则两节点不存在连接关系.

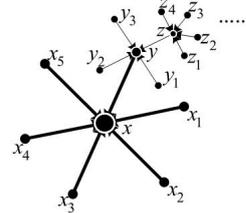


图2 货车之间的协调示意图

注1 如果两辆车的合并策略都采用调度方案, 即两辆车重新规划后的路径与原始车辆路径无关, 随着跟随车辆的增多计算复杂性将以指数级增加, 最终很难得到有效的结果.

2.2 基于中心聚类划分的领航车选择算法

根据式(8)-(11), 可以判断路网中运输货车的合并可行性, 得到可编队车辆集合 Φ_v , 再从 Φ_v 中筛选出最佳领航货车集合 Φ_L . 所谓最佳领航车即车辆跟随其行驶可最大化的节约运输成本. 从可编队车辆集合中筛选出最佳领航货车集合, 并将其余货车作为跟随车, 与其最佳领航货车匹配, 该问题可以描述为:

问题1: 寻求集合 $\Phi_L \subset \Phi_v$ 使得 $J(\Phi_L)$ 最大化:

$$J(\Phi_L) = \sum_{i \in \Phi_v \setminus \Phi_L} \max_{j \in \Phi_L} k_i(i, j) \quad (12)$$

其中, 当 $i \in \Phi_v \setminus \Phi_L$ 且 $j = \arg \max_{j \in \Phi_L} (k_i(i, j))$, 则认为 i 跟随 j 行驶.

该优化问题可以借鉴中心聚类划分的思想求解, 其基本思想为: 首先, 为每一个簇随机选取一个代表对象; 然后, 根据剩余对象与代表对象的相异度或距离, 将其分配到最近的一个簇; 最后, 反复地进行非代表对象与代表对象的替换操作, 提高聚类的质量. 引入一个用来评估聚类质量的代价函数, 该函数的作用是判断一个非代表对象是否是当前一个代表对象好的代替, 如果是则进行替换, 否则不替换, 最终给出最佳的划分.

首先初始化 Φ_L 集合为空, 在每次迭代中选择一辆车 $j \in \Phi_v$ 作为领航车, 然后引入下列代价函数 $\Delta_g = (j, \Phi_v)$ 来衡量车辆 j 作为领航车获得的节省成本的增益:

$$\Delta_g(j, \Phi_L) = \begin{cases} J(\Phi_L \setminus \{j\}) - J(\Phi_L) & j \in \Phi_L \\ J(\Phi_L \cup \{j\}) - J(\Phi_L) & j \notin \Phi_L \end{cases} \quad (13)$$

$\Delta_g(j, \Phi_L) > 0$ 说明节省的运输成本将会增加, 表示可以被替换, 反之, 则放弃替换. 基于以上分析, 给出如下基于中心聚类划分的领航车选择算法.

算法 1 领航车选择算法:

step 1: 初始化 $\Phi_L \leftarrow \emptyset, \Phi_v \leftarrow \emptyset$;

step 2: 选择 $j \in \Phi_v$ 作为领航车辆, 若 $\Delta_g = (j, \Phi_L) > 0$ 且 $j \notin \Phi_L$, 则 $\Phi_L \leftarrow \Phi_L \cup \{j\}$;

(1) 若 $\Delta_g = (j, \Phi_L) > 0$ 且 $n \in \Phi_L$, 则从中删去 j ;

(2) 若 $\Delta_g = (j, \Phi_L) \leq 0$, 不执行任何操作.

step 3: 重复 step 2 直到 $\Delta_g = \max_{j \in \Phi_v} (j, \Phi_L) \leq 0$.

3 运输车队速度规划

以上研究是在车队匀速行驶的条件下进行的, 由于车队中车辆的异质性以及道路的坡度影响, 坡度越大, 要保持一样的速度行驶就会消耗更多的燃油, 如果能够在车队行驶过程中对速度进行规划, 将能够进一步节省运输成本. 为了充分考虑坡度因素, 本节的运输成本模型将坡度考虑在内, 并采用基于空间采样的方法对车队速度进行规划. 首先建立车辆的非线性模型, 然后对车队的平均模型进行空间离散化, 最后构造速度优化问题并设计优化算法, 获得最优速度规划曲线, 最小化车队的运输成本.

3.1 运输车队模型

考虑道路坡度对车队最优速度的影响, 根据牛顿第二定律, 建立如下的非线性车辆模型:

$$\dot{p}_i(t) = v_i(t) \quad (14)$$

$$m_i \dot{v}_i(t) = F_{e,i}(t) - F_{g,i}(t) - F_{r,i}(t) - F_{air,i}(v_i(t), d_i(t)) \quad (15)$$

其中, p_i 和 m_i 分别为车辆 i 的位置和质量, $F_{e,i}(t)$ 为发动机提供的力, $F_{g,i}(t) = m_i g \sin(\theta_r(t))$ 为重力引起的力, θ_r 为道路的坡度, g 为重力加速度. $F_{r,i}(t) = c_r m_i g \cos(\theta_r(t))$ 为作用于车身的滚动阻力, c_r 为滚动阻力系数. $F_{air,i}(v_i(t), d_i(t)) = \frac{1}{2} \rho c(d_i(t)) A_i v_i^2(t)$ 为车辆行驶过程中的空气阻力, ρ 为空气密度, A_i 为车辆的横截面积, $c(d_i(t))$ 是依赖于车间距 $d_i(t)$ 的空气阻力系数. 假设领航车的空气阻力相当于单独驾

驶时的情况, 忽略车队模式对其空气阻力的影响, 即 $c(d_i(t)) = c_d, c_d$ 为风阻系数.

将异质车队看作整体, 根据车辆模型 (14)-(15), 定义车队状态 $x_p(t) = [p_p(t), v_p(t)]^T$, 其中, $p_p(t)$ 和 $v_p(t)$ 分别为车队的位置和速度. 定义车队的平均发动机力 $F_{ep}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} F_{e,i}(t)/N$ 和质量 $m_p = \sum_{i=0}^{N-1} m_i/N$. 则车队的平均模型可写为:

$$\dot{p}_p(t) = v_p(t) \quad (16)$$

$$m_p \dot{v}_p(t) = -c_r m_p g \cos(\theta_r(t)) - m_p g \sin(\theta_r(t)) - \frac{1}{2} \rho c_p A_p v_p^2(t) + F_{ep}(t) \quad (17)$$

其中, $c_p(t) = (c_d + \sum_{i=1}^{N-1} (1 - \eta_i(d_i(t)))c_d)/N$, $A_p = \sum_{i=0}^{N-1} A_i/N$.

3.2 车队运输成本建模

上一节的简易油耗模型没有考虑道路坡度的影响, 无法进行速度规划和更进一步的成本计算. 本节从动力系统的角度, 建立与车辆质量、滚动阻力和空气阻力三个因素相关的油耗模型, 其中后两项均与道路坡度有关. 根据文献 [21], 车队的平均机械功率 $Pow_p(t)$ 为:

$$Pow_p(t) = \left(\frac{1}{2} \rho A_p c_p v_p^2(t) + m_p g \sin(\theta_r(t)) + c_r m_p g \cos(\theta_r(t)) + m_p a_p(t) \right) v_p(t) \quad (18)$$

车队的油耗模型 $F_{rate,p}(t)$ 与机械功率的转换关系^[22] 为:

$$F_{rate,p}(t) = \frac{\xi}{\kappa \psi} \left(LMD + \frac{Pow_p(t)}{\eta_t \eta_{tf}} \right) \quad (19)$$

其中, ξ 为燃控比, κ 为燃料的热值, L, M, D, η_t 和 η_{tf} 分别为发动机的摩擦系数, 发动机速度, 排气量, 转换因子, 发动机的效率参数和传动系统效率系数. 则车队油耗成本 $J_{f,p} = \vartheta_1 \sum_{h=n_i+1}^{n_i+d} \int_0^{l_i[h]} \frac{F_{rate,p}(t)}{v_p(t)} ds$, 时间成本 $J_{t,p} = \vartheta_2 \sum_{h=n_i+1}^{n_i+d} \int_0^{l_i[h]} \frac{1}{v_p(t)} ds$, 将二者带入式 (4) 中, 得到该油耗模型下的车队运输成本函数 J_p .

3.3 基于空间采样的车队速度规划

本节给出一种车队速度规划方案, 该方案以车队整体运输成本最小为优化目标, 即, $\min J_p$, 生成最优参考速度曲线 $v_p^*(t)$.

3.3.1 基于空间采样的速度规划

空间采样的速度规划是在已知路况信息的情形下, 来预测车队接下来的行驶速度的行为. 如图 3 所示, 速度规划是通过滚动动态规划来完成的, 将总行

程划分为若干个子行程 S_{DP} , 再将每个 S_{DP} 等分成 H 个 Δs 部分, 速度规划在 S_{DP} 内按从 $h = H$ 到 $h = 1$ 的顺序进行. 在当前时间周期内, 仅在 $h = 1$ 处得到速度的最优解, 并将该解用于车队系统, 然后在下一个周期重复该过程, 令 j 为规划过程的第 j 个循环周期, 则 (j, h) 代表第 j 次循环的第 h 阶段. 对于每个阶段, 假设道路坡度和速度限制等条件已知. 对于行驶在高速公路的车队, 可忽略车辆区间速度变化问题, 在区间上可假定车队匀速行驶, 即 $a_p(t)=0$. 令 $\Delta s = p_{(j,h+1)} - p_{(j,h)}$, 其中 $p_{(j,h)}$ 为第 j 次循环第 h 阶段的空间位置, $v_{(j,h)}$ 为车辆在位置 $p_{(j,h)}$ 时的速度, $\theta_r(p_{(j,h)})$ 为其对应的坡度. 则车队平均模型 (17) 的离散空间表达式为:

$$\begin{aligned} v_p(p_{(j,h+1)}) = & \frac{\Delta s}{m_p v_p(p_{(j,h)})} \times (-c_r m_p g \cos(\theta_r(p_{(j,h)})) \\ & - m_p g \sin(\theta_r(p_{(j,h)})) - \frac{1}{2} \rho A_p c_p v_p^2(p_{(j,h)}) \\ & + F_{ep}(p_{(j,h)}) + v_p(p_{(j,h)}) \end{aligned} \quad (20)$$

可简写为 $v_p(p_{(j,h+1)}) = f_p^s(v_p(p_{(j,h)}), F_{ep}(p_{(j,h)}))$.

第 j 个循环周期的成本函数可表示为:

$$J_p(j) = \alpha J_{f,p}(j) + \beta J_{t,p}(j) \quad (21)$$

其中, $J_{f,p}(j) = \vartheta_1 \sum_{h=1}^H F_{rate,p}(h) \times (\Delta s / v_p(p_{(j,h)}))$, $J_{t,p}$

$$(j) = \vartheta_2 \sum_{h=1}^H \Delta s / v_p(p_{(j,h)}).$$

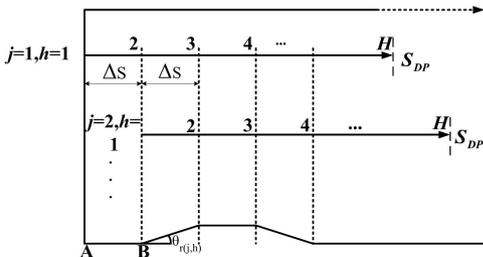


图3 考虑道路坡度的车队结构

为了实现车队运输成本的最小化, 在进行车队速度的规划时, 构造如下的优化问题:

问题 2:

$$\min_{F_{ep}(j)} J_p(j)$$

约束条件:

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & v_p(p_{(j,h+1)}) = f_p^s(v_p(p_{(j,h)}), F_{ep}(p_{(j,h)})); \\ & F_{ep,\min} \leq F_{ep}(j, h) \leq F_{ep,\max}; \\ & v_{p,\min}(j, h) \leq v_p(j, h) \leq v_{p,\max}(j, h); \\ & v_p(j, 1) = v_p(t); \\ & p_p(j, 1) = p_p(t); \end{aligned} \quad (22)$$

$j = 1, 2, \dots, h = 1, 2, \dots, H$, 其中, 条件 2) 为路段

(j, h) 的输入限制条件, 条件 3) 为路段 (j, h) 的速度限制条件, 4) 和 5) 是第 j 个循环周期的初始条件.

3.3.2 滚动动态规划算法

采用滚动动态规划求解上述优化问题, 最低成本按式 (23) 计算:

$$J_p(j, h)(v_p(p_{(j,h)})) = \min_{F_{ep}(p_{(j,n)}) \in F_{ep,s}} \left\{ \begin{aligned} & \gamma_h(v_p(p_{(j,h)}), F_{ep}(p_{(j,h)})) \\ & + J(j, h+1)(v_p(p_{(j,h+1)})) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

其中, $\gamma_h(v_p(p_{(j,h)}), F_{ep}(p_{(j,h)})) = \vartheta_1 F_{rate,p}(h) \times (\Delta s / v_p(p_{(j,h)})) + \vartheta_2 \Delta s / v_p(p_{(j,h)})$ 为第 j 个循环周期第 h 阶段的运输成本增量, $h = H - 1, H - 2, \dots, 1, J_p(j, h+1)(v_p(p_{(j,h+1)}))$ 是从速度 $v_p(p_{(j,h+1)})$ 到末端速度 $v_p(p_{(j,H)})$ 的最小成本. 在每一阶段 h , 速度以 μ_v 为间隔, 量化成 $N_{v_p} + 1$ 级, 即 $v_p(p_{(j,h)}) = \{v_p^1, v_p^1 + \mu_v, \dots, v_p^1 + N_{v_p} \mu_v\}$, 其中 $v_p^1 = v_{p,\min}, v_p^1 + N_{v_p} \mu_v = v_{p,\max}$; 驱动力以 μ_F 为间隔, 量化成 $N_{F_{ep}} + 1$ 级, 即 $F_{ep}(p_{(j,h)}) = \{F_{ep}^1, F_{ep}^1 + \mu_F, \dots, F_{ep}^1 + N_{F_m} \mu_F\}$, 其中, $F_{ep}^1 = F_{ep,\min}, F_{ep}^1 + N_{F_m} \mu_F = F_{ep,\max}$. 将这些量化值应用于式 $v_p(p_{(j,h+1)}) = f_p^s(v_p^k(p_{(j,h)}), F_{ep}^l(p_{(j,h)}))$, 以递归运算的方式计算所有阶段 h 的速度, 其中, $v_p^k(p_{(j,h)}) \in [v_{p,\min}(p_{(j,h)}), v_{p,\max}(p_{(j,h)})]$ 为第 j 次循环第 h 阶段的第 k 个量化值, $k = 1, 2, \dots, N_{v_p} + 1, F_{ep}^l(p_{(j,h)}) \in [F_{ep,\min}(p_{(j,h)}), F_{ep,\max}(p_{(j,h)})]$ 为第 j 次循环第 h 阶段的第 l 个量化驱动力, $l = 1, 2, \dots, N_{F_{ep}} + 1$.

基于以上分析, 给出车队速度规划算法.

算法 2 基于滚动动态规划的速度规划算法:

step 1: 令 $j = 1$, 设置速度间隔 μ_v 和驱动力间隔 μ_F ;

step 2: 检测第 j 次循环时领航车状态 $v_0(j, 1)$, 并且令 $v_p(j, 1) = v_0(j, 1)$;

step 3: 遍历状态空间 $v_p(p_{(j,h+1)})$ 计算 $J_p(j, H)$;

step 4: 对 $k = 1, 2, \dots, N_{v_p} + 1, l = 1, 2, \dots, N_{F_{ep}} + 1$, 从 $h = H - 1$ 到 $h = 1$ 求解优化问题, 获得对应于 $v_p^k(p_{(j,h)})$ 的可执行决策 $F_{ep}^{k,l}(p_{(j,h)})$;

step 5: 将 $v_p(p_{(j,1)})$ 带入 step 4 的结果, 逆推出最终的最优解序列 $F_{ep}(j) = \{F_{ep}^*(p_{(j,h)})\}_{h=1}^H$;

step 6: 得出 $F_{ep}(j)$ 的第一项, 即对于优化问题, 有 $F_{ep}(j, 1) = F_{ep}^*(j, 1)$, 并输出 $v_p^*(j, 2)$;

step 7: 令 $j = j + 1$, 并返回 step 2;

注 2 本文动态规划求解的问题具有如下特性:

1、最优子结构: 问题的最优解所包含的子问题的解也是最优的, 满足最优化原理, 最优子结构的表达式如问题 2. 基于此特性, 可以写出最优解的递推

方程, 如式 (23) 所示.

2、重叠子问题: 用递归方式对问题进行求解时, 每次产生的子问题并不总是最新的, 部分子问题会被重复计算多次. 基于此特性, 对求解的结果进行保存, 可以避免重复计算, 节省时间.

3、无后效性: 如果某阶段状态一旦确定后, 则从此阶段以后过程的发展变化仅与此阶段的状态有关, 不受这个阶段以前各段状态的影响.

4 仿真实验

4.1 车队协调规划

构造如图 4 所示的路网图, 该路网由 50 个结点组成, 两个结点之间的权值为对应的路段长度. 以货车行驶距离最短为指标, 在路网中生成 20 个运输任务. 每个运输任务都对应一辆运输货车, 给定起始点和目的点. 简易油耗模型的参数设为^[23]: $F_1 = 1, F_0 = 1/22.2, F_{p,1} = 0.9F_1, F_{p,0} = 0.9F_0$, 式 (4) 中 $\alpha=0.6, \beta=0.4$.

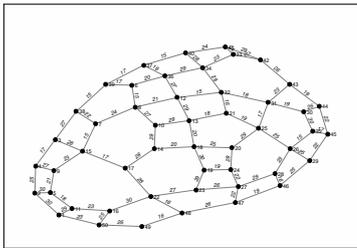


图 4 路网示意图

通过公式 (11) 循环计算两车之间的成本节约率, 以路网中的车辆为节点, 两车之间的成本节约率为权值, 构建相应的运输货车之间的协调关系图. 如图 5 所示, 车辆 16 和 19 相连但与其他车辆节点分离, 因此该两辆车可以组成车队, 但跟其他车辆无法合并行驶; 同理车辆 6、18 和 20 可以组成车队行驶但与其他车辆无法合并行驶. 而剩下车辆节点之间都存在相互连接, 需要基于算法 1, 进行运输货车的分组, 从中筛选出最佳领航货车.

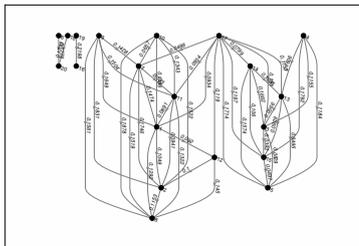


图 5 货车的协调示意图

筛选出的领航货车及其跟随货车示意图如图 6 所示, 图中上方的 16 个节点为跟随车, 下方的 4 个节点为领航车. 例如节点 5 和其相应的连接节点 3、4、13、14、15、17, 就表示领航车 5 及其相应的六辆跟随车.

图中分别以 5、8、16、20 为领航车合并成车队行驶, 车队的规模分别为 6、7、1、2.

采用文献 [19] 中提出的车辆协调规划算法, 筛选出的领航货车及其跟随货车示意图如图 7 所示, 分别以 8、15、16、20 为领航车合并成车队行驶, 车队的规模分别为 7、6、1、2. 本文规划出的领航车使得车队平均运输成本节约率为 $k=0.1386$, 按照文献 [19] 方法规划出的领航车使得车队平均运输成本节约率为 $k=0.1320$. 通过平均成本节约率比较可以看出, 本文提出的算法能更好的从可编队货车集合中, 筛选出使得车队平均运输成本节约率最佳的领航货车.

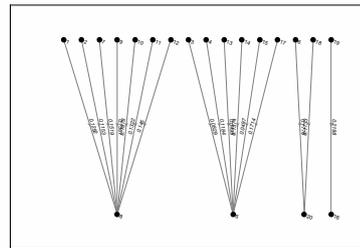


图 6 本文算法规划出的领航货车及其相应的跟随货车

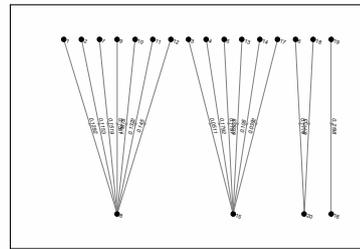


图 7 用文献 [19] 算法规划出的领航车及其跟车集合

4.2 车队速度规划

考虑由领航车 8 组成的车队, 行驶在图 8 所示的 30km 的道路上, 车辆参数见表 1.

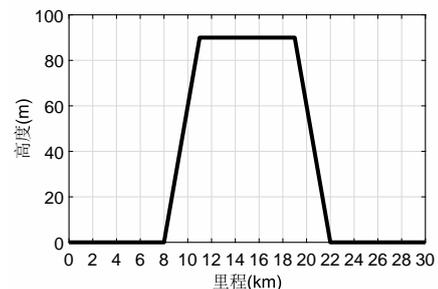


图 8 路况图

表 1 车辆参数表

| 参数 | 数值 |
|-------------------|--------------------------------------|
| 平均质量 m_p | 40t |
| 滚动阻力系数 c_r | 3×10^{-3} |
| 车辆横截面积 A_p | $10m^2$ |
| 发动机时间常数 ζ_i | 0.25s |
| 空气密度 ρ | $1.29kg \times 10^{-3}$ |
| 空气阻力系数 c_p | 0.3 |
| 速度限制 | $v_{p,max}=92km/h, v_{p,min}=80km/h$ |
| 风阻系数 (c_d) | 0.6 |

路况由三部分组成, 包括上坡路段, 水平路段及下坡路段, 其中上下坡的坡高与坡长之比分别为 3% 和-3%, 两路段长度均为 3km. 将考虑坡度因素的油耗模型参数设为^[28]: $\xi=1, \kappa=44, L=0.2, M=33, D=5, \psi=737, \eta_t=0.9, \eta_{tf}=0.4, \Delta s=100m$, 令 $\alpha=0.6, \beta=0.4$. 由算法 2 获得的车队最佳速度曲线如图 9 所示, 从图中可以看出, 在上坡路段车辆以较低的速度行驶, 上坡之后速度保持在 87.76km/h, 而下坡时保持较高的速度行驶. 文献 [24] 采用一种基于参考速度预设的方法, 其仿真结果如图 9 所示. 未采取速度规划和采取速度规划的运输成本对比如图 10 所示.

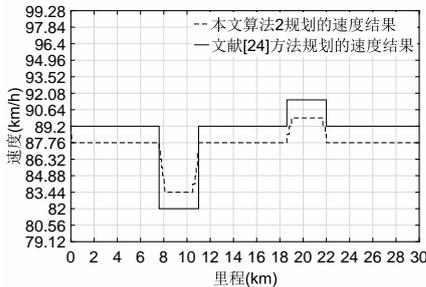


图9 基于本文策略和文献[24]策略的节油参考速度

经计算, 在图 8 所示的路况中, 车队按照图 9 中本文算法 2 规划的最佳速度行驶所产生的运输成本, 与未进行速度规划保持恒定车速行驶相比, 运输成本节约率为 7.2%, 采用文献 [24] 的方法计算出的运输成本节约率为 3.8%. 证明本文所给的车队速度规划算法能够进一步节约车队的运输成本.

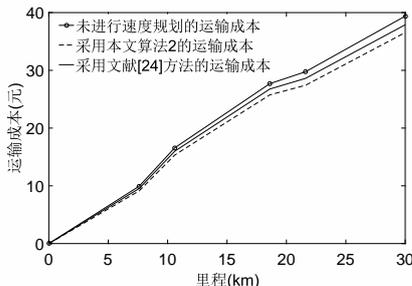


图10 不同策略的运输成本对比

5 结论

本文构造基于时间成本和油耗成本的运输成本模型, 根据车辆合并可行性判断条件, 得出路网中可编队车辆集合并构造车辆协调图. 采用一种基于中心聚类划分的领航车选择算法, 从可编队车辆集合中, 选择出最大化节约车队运输成本的领航车并完成车队划分. 考虑道路坡度及速度限制等条件, 采用基于空间采样的动态规划方法对车队的速度进行优化, 进一步节约运输成本, 从而规划出最小车队运输成本的优化方案. 通过仿真实验和与不同优化策略的对比分析, 验证了本文优化方案的可行性和有效

性. 但本文调度方案是以领航车的原始路径为公共路径, 忽略了整个路网的最优调度路径, 所以路网中所有车辆都采用调度方案的策略值得进一步研究.

参考文献 (References)

- [1] 刘长石, 申立智, 盛虎宜, 等. 考虑交通拥堵规避的低碳时变车辆路径问题研究 [J]. 控制与决策, 2020, 35(10): 2486-2495.
(Liu C S, Shen L Z, Shen H Y, et al. Research on low-carbon time-dependent vehicle routing problem with traffic congestion avoidance approaches[J], Control and Decision, 2020, 35(10): 2486-2495.)
- [2] Besselink B, Turri V, Van De Hoef S H, et al. Cyber-Physical Control of Road Freight Transport[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(5): 1128-1141.
- [3] 郭露露, 高炳钊, 陈虹. 汽车经济性行驶优化 [J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(5): 560-570.
(Guo L L, Gao B Z, Chen H. Optimal Ecodriving Control of Vehicles[J]. Scientia Sinica Informationis, 2016, 46(5): 560-570.)
- [4] 杨琦, 张静晓, 蔡雯怡, 等. 环境约束下中国交通运输业产能利用测算 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 226-234.
(Yang Q, Zhao J X, Cai W Y, et al. Measuring the Capacity Utilization of China Transportation Industry Under Environmental Constraints[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(11): 226-234.)
- [5] Yang H, Rakha H, Ala M V. Eco-Cooperative Adaptive Cruise Control at Signalized Intersections Considering Queue Effects[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 18(16): 1575-1585.
- [6] 杨刚, 张东好, 李克强, 等. 基于车车通信的车辆并行协同自动换道控制 [J]. 公路交通科技, 2017, 34(1): 120-129.
(Yang G, Zhang D H, Li K Q, et al. Cooperative Same-direction Automated Lane-changing Based on Vehicle-to-vehicle Communication[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(1): 120-129.)
- [7] Ma F, Yang Y, Wang J, et al. Predictive Energy-saving Optimization Based on Nonlinear Model Predictive Control for Cooperative Connected Vehicles Platoon with V2V Communication[J]. Energy, 2019, 189: 116120.1-116120.15.
- [8] Liu J, Zhao W, Xu C. An Efficient On-Ramp Merging Strategy for Connected and Automated Vehicles in Multi-Lane Traffic[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, PP(99): 1-12.
- [9] 林楠, 刘丽, 马力, 等. 适应空气阻力变化的商用车质量辨识算法 [J]. 中国公路学报, 2016, 29(8): 143-151.
(Lin N, Liu L, Ma L, et al. Mass Identification Method for Commercial Vehicle with Air Resistance Adaptability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(8): 143-151.)
- [10] Na G, Park G, Turri V, et al. Disturbance Observer

- Approach for Fuel-efficient Heavy-duty Vehicle Platooning[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020, 58(5): 748-767.
- [11] Hoef S V D, Mårtensson J, Dimarogonas D V, et al. A Predictive Framework for Dynamic Heavy-duty Vehicle Platoon Coordination[J]. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 2019, 4(1): 1-25.
- [12] 郭洪艳, 黄河, 尹震宇, 等. 高速公路卡车队列行驶非线性滚动优化控制 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2019, 49(2): 552-561.
(Guo H Y, Huang H, Yin Z Y, et al. Nonlinear Moving Horizon Control of Truck Platooning on Highway[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2019, 49(2): 552-561.)
- [13] 于晓海, 郭戈. 一种协作式车队控制的新方法 [J]. *控制与决策*, 2018, 33(07): 1223-1230.
(Yu X H, Guo G. A New Method of Collaborative Fleet Control[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(07): 1223-1230.)
- [14] Guo G, Wang Q. Fuel-Efficient En Route Speed Planning and Tracking Control of Truck Platoons[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(8): 3091-3103.
- [15] 李珍萍, 张煜炜. 带时间窗和服务顺序约束的多需求车辆路径问题 [J]. *控制与决策*, 2019, 34(07): 1565-1570.
(Li Z P, Zhang Y W. Multi-demand vehicle path problem with time window and service order constraint[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(07): 1565-1570.)
- [16] Zhang W, Jenelius E, Ma X L. Freight transport platoon coordination and departure time scheduling under travel time uncertainty[J]. *Transportation Research Part E*, 2017, 98: 1-23.
- [17] Larson J, Liang K, Johansson K H. A Distributed Framework for Coordinated Heavy-Duty Vehicle Platooning[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(1): 419-429.
- [18] Liang K, Martensson J, Johansson K H. Heavy-Duty Vehicle Platoon Formation for fuel Efficiency[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(4): 1051-1061.
- [19] 原豪男, 郭戈. 交通信息物理系统中的车辆协同运行优化调度 [J]. *自动化学报*, 2019, 45(1): 143-152.
(Yuan H N, Guo G. Vehicle Cooperative Optimization Scheduling in Transportation Cyber Physical Systems. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(1): 143-152.)
- [20] Turri V, Besselink B, Johansson K H. Cooperative Look-Ahead Control for Fuel-Efficient and Safe Heavy-Duty Vehicle Platooning[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 25(1): 12-28.
- [21] Goeke D, Schneider M. Routing A Mixed Fleet of Electric and Conventional Vehicles[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 245(1): 81-99.
- [22] 王琼, 郭戈. 车队速度滚动时域动态规划及非线性控制 [J]. *自动化学报*, 2019, 45(05): 888-896.
(Wang Q, Guo G. Rolling Time Domain Dynamic Programming and Nonlinear Control of Vehicle Speed[J]. *Acta automatica Sinica*, 2019, 45(05): 888-896.)
- [23] Kamal M, Mukai M, Murata J, et al. Ecological Vehicle Control on Roads With Up-Down Slopes[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(3): 783-794.
- [24] Xiao L, Gao F. Practical String Stability of Platoon of Adaptive Cruise Control Vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4): 1184-1194.

作者简介

卢自宝(1985—), 男, 副教授, 博士, 从事智能网联车辆的调度与控制的研究, E-mail: luzibao@163.com;

田凯健(1998—), 男, 硕士生, 从事车辆的协同调度与控制的研究, E-mail: tian_kaijian@163.com;

方明星(1971—), 男, 教授, 博士, 从事控制系统扰动抑制的研究, E-mail: mxfang@ahnu.edu.cn;

曲立国(1979—), 男, 副教授, 博士, 从事智能控制系统与信号处理的研究, E-mail: lqqu@ahnu.edu.cn.