

车队速度滚动时域动态规划及非线性控制

王琼¹ 郭戈^{2,3}

摘要 考虑自主车辆队列的节能安全问题, 本文提出一种车辆队列协同控制方法, 该方法可保证车队低能耗安全行驶. 首先, 充分考虑道路坡度以及车队异质性建立车队非线性模型, 利用基于油耗模型的优化指标构建车队速度优化问题, 提出一种滚动时域动态规划算法 (Receding horizon dynamic programming, RHDP), 获得车队的参考速度. 然后, 基于非线性车辆模型, 运用反步法设计车辆跟踪控制器, 并进行车队队列稳定性分析. 这种协同控制方法的有效性已通过数值仿真和智能交通实验平台的验证.

关键词 车队油耗, 滚动动态规划, 非线性控制, 速度跟踪, 队列稳定性

引用格式 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

DOI 10.16383/j.aas.c170442

Platoon Speed Receding Horizon Dynamic Programming and Nonlinear Control

WANG Qiong¹ GUO Ge^{2,3}

Abstract This paper considers the problem of fuel-efficient and safe of autonomous platoons. A cooperative control is presented, which can guarantee safety driving of a platoon with the lowest fuel consumption. First, we develop a nonlinear platoon vehicle dynamic model considering road topography and platoon heterogeneity. The optimization problem is formulated by using the optimization index, which is a function of fuel consumption. A receding horizon dynamic programming (RHDP) methodology is proposed to obtain the reference velocity. Then, based on the nonlinear vehicle model and exploiting backstepping methodology, the tracking controller is designed, and further the string stability of the platoon is analyzed. The effectiveness of the presented cooperative method is demonstrated by both numerical simulation and experiments with laboratory-scale Arduino cars.

Key words Platoon fuel consumption, receding dynamic programming, nonlinear control, speed tracking, string stability

Citation Wang Qiong, Guo Ge. Platoon speed receding horizon dynamic programming and nonlinear control. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(5): 888–896

近年来, 随着汽车保有量不断增大和人员往来日渐频繁, 地面交通运输流量显著增加. 而另一方面, 受资金和空间资源所限, 道路扩容升级的速度有所放缓. 这导致大型城市和主要高速公路的交通状况日益恶化, 造成大量的矿物燃料消耗和尾气排放. 交通拥堵不仅使运输成本增大, 严重污染环境, 甚至导致频繁的交通事故, 造成巨大的经济损失和人员伤亡. 根据 2011 年国际交通论坛的数据, 世界上每年死于交通事故的人数达 130 多万, 如果不

采取措施, 这个数字将可能上升到 190 万^[1]. 高德 2017 年第一季度交通报告显示, 北京高峰拥堵延时指数达 1.884, 平均车速仅 24.82 km/h. 另据估计, 在欧洲地区的地面交通排放的二氧化碳占总排放量的 29%^[2]. 因此, 研究能改善交通运行效率、降低能耗的车辆队列控制系统意义重大, 且非常紧迫.

研究表明, 有效地控制车辆流, 使同一车道的车辆以较小的车间距列队行驶, 可显著缓解交通拥堵, 提高交通容量, 降低车辆油耗, 减少尾气排放^[3]. 实验结果显示, 重型车辆因空气阻力产生的油耗约占总油耗的四分之一^[4], 而采用车辆队列控制技术可减少油耗约 10%^[5–6]. 可见, 车队控制是智能交通控制系统中的关键技术之一. 车辆队列控制中的重要问题之一是队列的稳定性. 由于车队中的车辆相互耦合, 某辆车的加速、减速操作会影响车队中的其他车辆, 导致车间距误差沿车队向后传播并放大, 可能导致车队不稳定, 甚至造成追尾事故. 车辆队列稳定性作为一个十分重要的问题已受到诸多研究人员的关注^[7–17]. 例如, 文献 [7] 提出两种基本的纵向控制方法, 即车辆跟随控制和点跟随控制; 文献 [8]

收稿日期 2017-08-02 录用日期 2018-03-12
Manuscript received August 2, 2017; accepted March 12, 2018
国家自然科学基金 (61273107, 61573077) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61273107, 61573077)

本文责任编辑 吕宜生
Recommended by Associate Editor LV Yi-Sheng
1. 大连理工大学控制科学与工程专业 大连 116024 2. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110004 3. 东北大学秦皇岛分校控制工程学院 秦皇岛 066004

1. School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024 2. Laboratory of Synthetical Automation for Industrial Process, Northeastern University, Shenyang 110004 3. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004

考虑网络资源有限, 提出一种基于事件触发的控制策略; 文献 [9] 提出基于迭代控制算法和最优控制理论的最优车队控制方法, 可使车辆跟随间距最小; 文献 [10–11] 分别研究了传感器失效和网络延时对车辆队列稳定性的影响; 文献 [12] 提出一种可保证车辆队列稳定性的分布式滚动时域控制方法; 文献 [13] 给出了一种车辆协同自适应巡航控制方法, 并基于频域方法获得保证车辆队列稳定性的条件; 文献 [14] 研究了不同信息流拓扑结构对车队队列稳定性的影响; 文献 [15] 考虑外界干扰, 提出一种可确保车队稳定性的分布式自适应积分滑模控制方法; 文献 [16] 提出一种基于通信可靠性的自适应切换控制策略, 确保异质车队的队列稳定性。

车辆列队行驶时车辆间存在耦合作用, 车队的油耗和整体性能受空气阻力以及路况影响较大, 因此, 合理地根据路况控制车队的行驶速度, 可显著降低车队的整体油耗, 同时保证车队整体性能 (如队列稳定性)。已有的车辆队列控制文献尚未考虑基于油耗的控制问题, 只有单个车辆行驶控制研究的文献中考虑了不同路况以及不同速度和加速度下的油耗特性, 并研究了油耗最低的车辆巡航速度^[18–19]。例如, 文献 [19] 研究车辆从静止加速到指定速度过程中最省油的加速度。考虑到车辆在行驶中反复加/减速、启/制动会消耗能量, 文献 [20–24] 提出了绿色驾驶 (或生态驾驶) 方法, 其中, 文献 [21–22] 通过预测前方交通信息制定车辆控制策略, 以尽可能减少变速次数; 文献 [23] 根据现有道路信息和车辆动态模型预测车辆未来状态, 然后基于预测状态和发动机油耗模型, 给出节能最优控制策略; 文献 [24–27] 对文献 [22] 进行了扩展, 利用道路交通信息、交叉路口的信号灯状态以及车辆油耗模型, 提出一种可对油耗进行优化的非线性模型预测控制方法。文献 [28] 研究了如何基于信号灯信息实现车辆低油耗环保驾驶控制。针对单车的油耗优化控制方法并不能直接推广应用于车队的节油控制, 如何针对不同路况确定车队的最优参考速度以降低车队整体油耗仍然是一个尚待解决的开放问题。

本文旨在结合油耗指标和安全性能, 研究经济节油的车辆队列控制方法。考虑道路坡度和车队异质性, 基于车队模型和油耗模型, 提出一种滚动时域动态规划方法 (Receding horizon dynamic programming, RHDP), 获得车队的最优速度。以此速度作为车队的参考速度, 基于车辆非线性模型, 采用反步法, 设计速度跟踪控制器。本文的主要创新点如下:

- 1) 同时考虑车队油耗及安全控制问题, 给出确保车队整体油耗最低和队列稳定性的协同控制方法。
- 2) 在车队速度规划部分, 考虑了不同路况下不

同质量和大小的异质车队整体油耗, 获得车队最优节油参考速度。

3) 基于非线性车辆动态模型设计跟踪控制器, 比基于线性化的方法更实际。

本文组织结构如下: 第 1 节给出所研究问题的数学描述、基于非线性车辆动态模型的车队建模、油耗模型以及控制目标; 第 2 节基于路况构造车队速度优化问题, 给出速度规划方法以及设计车队控制器实现速度跟踪, 并进行车队队列稳定性分析; 第 3 节是数值仿真和实验验证; 最后, 在第 4 节进行总结。

1 问题描述及目标

考虑 N 辆车组成的车队在有坡度的路况下行驶 (见图 1), p_i, v_i, a_i 分别为第 i 辆车的位置、速度和加速度, 这里 $i = 0, \dots, N-1$, 其中, $i = 0$ 表示领队车, 其余车辆为跟随车。领队车定期通过无线网络将其速度、加速度信息传给跟随车, 每辆跟随车都带有车载传感器以测量自身的位置、速度、加速度以及与前车的车间距。

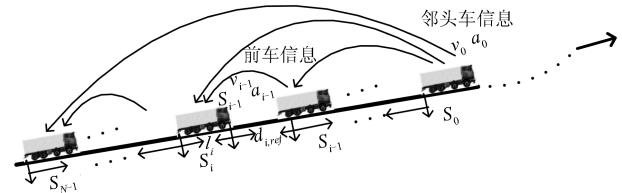


图 1 车辆队列

Fig. 1 A vehicular platoon

1.1 车队建模

据牛顿第二定律, 建立第 i 辆车纵向行驶时的动力学模型:

$$\frac{ds_i}{dt} = v_i(t) \quad (1)$$

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = F_{e,i} - F_{g,i} - F_{r,i} - F_{air,i}(v_i(t), d_i) \quad (2)$$

其中, $F_{e,i}$ 是发动机提供的力, $F_{g,i}$ 为重力引起的力, $F_{r,i}$ 和 $F_{air,i}$ 分别为作用于车身的滚动阻力和空气阻力。具体而言, $F_{g,i} = m_i g \sin(\theta(t))$, $F_{r,i} = c_r m_i g \cos(\theta(t))$, $F_{air,i}(v_i, d_i) = \frac{1}{2} \rho c_{D,i} A_i v_i^2$ 。其中, g 是重力加速度, θ 是道路坡度, c_r 是阻力系数, ρ 是空气密度, $c_{D,i}$ 是空气阻力系数, A_i 是横截面面积。

期望车间距 $d_{i,ref}$ 定义为:

$$d_{i,ref} = v_i \zeta \quad (3)$$

其中, ζ 为固定时间。

将车队看作整体, 根据车辆模型 (1)、(2) 和车间距策略 (3), 我们定义车队状态 $\mathbf{x}_p = [s_p, v_p]^T$, 其

中, s_p 和 v_p 分别为车队的位置和速度. 定义车队发动机力 $F_{e,p}$ 和质量 m_p 分别为:

$$F_{ep} = \sum_{i=0}^{N-1} F_{e,i} \quad (4)$$

$$m_p = \sum_{i=0}^{N-1} m_i \quad (5)$$

则, 车队的动态方程可写为:

$$\frac{ds_p}{dt} = v_p(t) \quad (6)$$

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = -c_r m_p g \cos(\theta(t)) - m_p g \sin(\theta(t)) - \frac{1}{2} \rho c_p v_p^2(t) + F_{ep}(t) \quad (7)$$

其中, $c_p = c_{D,0} A_0 + \sum_{i=1}^{N-1} \eta_i c_{D,0} A_i$, $c_{D,0}$ 为领头车的风阻系数, A_i 为车辆横截面积, η_i 是跟随车风阻减少系数, $0 < \eta_i < 1$.

1.2 油耗模型

车辆油耗与三个重要因素有关, 分别为质量、滚动阻力和空气阻力, 后两者均与道路坡度相关.

根据文献 [29], 车队的平均机械功率 P_p 为:

$$P_p = \left(\frac{1}{2} \rho A_p c_p v_p^2 + m_p g \sin(\theta) + c_r m_p g \cos(\theta) + m_p a_p \right) v_p \quad (8)$$

机械功率 P_p 可直接转化为油耗率 $F_{rate,p}$:

$$F_{rate,p} = \frac{\xi}{\kappa \psi} \left(LMD + \frac{P_p}{\eta_t \eta_{tf}} \right) \quad (9)$$

其中, ξ 为燃空比, κ 为燃料的热值, ψ 、 L 、 M 、 D 、 η_t 、 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、柴油机的效率参数和传动系统效率系数.

1.3 控制目标

本文的目标是针对车队规划速度使得整体油耗成本最低, 设计控制器实现车队节油控制并确保车队稳定性, 即满足如下三点要求:

1) 最小化车队油耗: 规划速度 $v_p^*(t)$ 使得车队油耗成本最低, i. e., $\min J = \int_0^T F_{rate,p}(v_p^*) dt$.

2) 跟踪参考速度: 设计控制器, 跟踪最优速度 $v_p^*(t)$.

3) 车队队列稳定性: 避免因领队或其他干扰使车间距误差沿队列向后递增, 即对所有 $\omega > 0$, 应保证 $|G_i(s)| = |G_i(j\omega)| \leq 1$, 其中, $G_i(s) = \delta_i(s)/\delta_{i-1}(s)$, $\delta_i(t) = s_{i-1}(t) - s_i(t) - d_{i,ref}$.

2 速度规划与跟踪控制

为实现车队节油安全控制, 首先给出车队最优参考速度规划, 然后设计跟踪控制器, 并进行队列稳定性分析.

2.1 基于路况的速度规划

本节的目的是基于非线性车队模型和油耗模型, 根据道路坡度、限速等信息为车队规划最节油参考速度. 首先, 给出 RHDP 概述并基于此离散化车队模型, 然后构建优化问题 1, 最后给出求解问题 1 的优化算法, 获得车队最优参考速度 v_p^* .

2.1.1 RHDP 概述与模型离散化

本文采用 RHDP 方法求解车队油耗最小问题. RHDP 方法以时间划分阶段, 每一次动态规划 (Dynamic programming, DP) 在前瞻域内实现, 即车队运输总时长的一段时间 T 内, 起始于 A 点, 仅将优化结果的第一项作用于系统, 此过程在 B 点重复, j 值代表第 j 次重复, 原理见图 2. 特别需要指出的是, 对于行驶在高速公路的车队, 在速度规划层可不考虑车辆速度变化问题, 而是假定车队匀速行驶, 即加速度 $a_p = 0$. 对于因道路或交通状况变化而加速或减速的问题, 我们将在车队速度跟踪控制层考虑和解决.

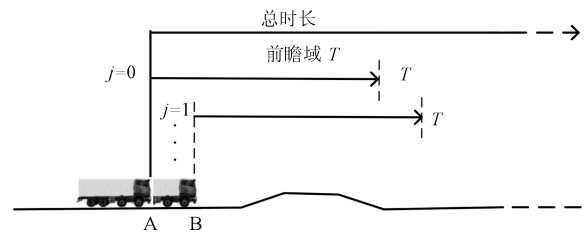


图 2 滚动时域动态规划

Fig. 2 Illustration of the receding dynamic programming

基于 RHDP 优化方法, 采用欧拉法对式 (7) 的车队模型在时域离散化, 可得:

$$\frac{v_{p,j}(k+1) - v_{p,j}(k)}{\Delta T} = \frac{1}{m_p} (-c_r m_p g \cos(\theta(k)) - m_p g \sin(\theta(k)) - \frac{1}{2} \rho A_p c_p v_{p,j}^2(k) + F_{ep,j}(k)) \quad (10)$$

其中, ΔT 为量化步长. 简化起见, 将 $v_{p,j}$ 记为 $v_{p,j}(k+1) = F(v_{p,j}(k), F_{ep,j}(k))$.

2.1.2 构建优化问题

基于 RHDP 算法, 优化目标可写为:

$$\min_{v_p(j)} J_{DP}(j) = \sum_{j,k=1}^{j,H} F_{rate,p}(k) \times \Delta T \quad (11)$$

其中, 前瞻域 T 被分割成 H 阶段, $T = (H-1)\Delta T$, $k = 1, 2, \dots, H$ 代表第 k 阶段, $j = 1, 2, \dots$ 代表第 j 次循环. 车队系统动态方程为:

$$v_{p,j}(k+1) = F(v_{p,j}(k), F_{ep,j}(k)) \quad (12)$$

受力约束:

$$F_{ep,min,j}(k) \leq F_{ep,j}(k) \leq F_{ep,max,j}(k) \quad (13)$$

速度约束:

$$v_{min,j}(k) \leq v_{p,j}(k) \leq v_{max,j}(k) \quad (14)$$

第 j 次循环时速度和位置的初始条件:

$$v_{p,j}(1) = v_p(t) \quad (15)$$

$$s_{p,j}(1) = s_p(t) \quad (16)$$

其中, $v_p(t)$ 和 $s_p(t)$ 为领队车 t 时的状态, 即, $v_p(t) = v_0(t)$, $s_p(t) = s_0(t)$.

2.1.3 RHDP 优化算法

针对优化问题, 我们给出如下的车队最优速度规划算法.

算法 1. 最优速度规划方法

1) 初始化 $j := 1$.

2) 测量领头车当前时刻状态 $v_0(t)$, $v_{p,j}(1) = v_0(t)$.

3) 计算 $J_{(j,H)}$.

4) $h = H-1, H-2, \dots, 1$ 求解动态规划问题

$$J_j(h)(x_{p,j}(h)) = \min_{u_{p,j}(h) \in U_s} \{v_h(x_{p,j}(h), F_{ep,j}(h)) + J_j(h+1)(x_{p,j}(h+1))\}$$

5) 将初始状态 $v_{p,j}(1)$ 代入步骤 4) 的结果, 逆推导求得最优控制输入序列 $F_{p,j} = \{F_{ep,j}^*(h)\}_{h=1}^{h=H}$.

6) 实现序列 $F_{p,j}$ 的第一项, 即将 $F_{ep,j}(1) = F_{ep,j}^*(1)$ 作用于系统方程 (10), 输出最优参考速度 $v_{p,j}^*(2)$.

7) 设置 $j := j+1$ 并返回步骤 2).

注 1. 这里的 RHDP 方法通过反复在线计算最优速度, 可提高系统的鲁棒性.

注 2. 规划所得的最优节油速度将传递给领头车, 作为车队跟踪控制层的参考速度.

2.2 跟踪控制器设计

本节的目的是设计控制器使得车队跟踪最优参考速度, 实现车队节油安全控制. 首先, 根据控制器设计需要进行模型处理, 然后, 采用反步法设计控制器, 最后, 分析队列稳定性.

2.2.1 模型预处理

由文献 [24] 可知, 方程 (2) 中第 i 辆车的发动机提供的力 $F_{e,i}$ 满足:

$$\dot{F}_{e,i}(t) = -\frac{1}{\varsigma_i} F_{e,i}(t) + \frac{1}{\varsigma_i} u_i(t) \quad (17)$$

其中, u_i 为第 i 辆车的控制输入, ς_i 是发动机常数. 由式 (2) 和式 (17), 有:

$$F_{e,i}(t) = m_i \dot{v}_i(t) + F_{a,i} + F_{g,i} + F_{r,i} \quad (18)$$

对式 (2) 两边求导, 且根据式 (18), 车辆的动态方程可重写为:

$$\begin{cases} \frac{ds_i}{dt} = v_i(t) \\ \frac{dv_i}{dt} = a_i(t) \\ \frac{da_i}{dt} = f_i(v_i(t), a_i(t)) + g_i(v_i(t))u_i(t) \end{cases} \quad (19)$$

其中, $f_i(v_i, a_i)$ 和 $g_i(v_i)$ 分别为:

$$\begin{aligned} f_i(v_i, a_i) &= -\frac{1}{\varsigma_i} (\dot{v}_i(t) + \frac{\rho A_i c(d_i)}{2m_i} v_i^2(t) + \\ &\quad c_r g \cos(\theta(t)) + g \sin(\theta(t))) + \\ &\quad c_r g \sin(\theta(t)) - g \cos(\theta(t)) - \\ &\quad \frac{\rho A_i c(d_i)}{m_i} v_i(t) a_i(t) \\ g_i(v_i) &= \frac{1}{\varsigma_i m_i} \end{aligned}$$

2.2.2 控制器设计

针对车队非线性模型, 通过反步法设计控制器, 确保车队跟踪最优参考速度.

第一步, 首先引入误差函数 $z_{i1}(t)$:

$$z_{i1}(t) = \delta_i(t) + e_i(t) \quad (20)$$

其中, $\delta_i(t) = s_{i-1}(t) - s_i(t) - d_{i,ref}$ 为车间距误差, $e_i(t) = s_0(t) - s_i(t) - id_{i,ref}$ 为跟踪误差. 对式 (20) 两边求导, 可得第 i 辆跟随车的加速度误差:

$$\dot{z}_{i1} = \dot{\delta}_i + \dot{e}_i = \dot{\delta}_i + v_0 - v_i \quad (21)$$

定义第一个李雅普诺夫函数:

$$V_{i1} = \frac{1}{2} z_{i1}^2 \quad (22)$$

其导数为:

$$\dot{V}_{i1} = z_{i,1}\dot{z}_{i,1} \quad (23)$$

定义第一个虚拟误差:

$$z_{i2}(t) = \alpha_{i,1}(t) - v_i(t) \quad (24)$$

取 $\alpha_{i,1}(t) = k_{i,1}z_{i,1} + \dot{\delta}_i + v_0$, $k_{i,1} > 0$, 则 $z_{i2}(t) = \alpha_{i,1}(t) - v_i(t) = \dot{z}_{i,1} + k_{i,1}z_{i,1}$, $\dot{z}_{i,1} = z_{i,2} - k_{i,1}z_{i,1}$, 可得:

$$\dot{V}_{i1} = -k_{i,1}z_{i,1}^2 + z_{i,1}z_{i,2} \quad (25)$$

如果 $z_{i,2} = 0$, 可得 $\dot{v}_{i1} = -k_{i,1}z_{i,1}^2 \leq 0$, 意味着第一个虚拟控制输入为:

$$v_i(t) = k_{i,1}z_{i,1} + \dot{\delta}_i + v_0 \quad (26)$$

类似第一步, 定义第二个李雅普诺夫函数和第二个虚拟误差分别为:

$$V_{i2} = V_{i,1} + \frac{1}{2}z_{i,2}^2 \quad (27)$$

$$z_{i3}(t) = \alpha_{i,2}(t) - a_i(t) \quad (28)$$

则, 第二个虚拟控制输入为:

$$a_i(t) = z_{i1} + k_{i,1}\dot{z}_{i,1} + k_{i,2}z_{i,2} + \ddot{\delta}_i + a_0 - a_1 \quad (29)$$

$z_{i3}(t)$ 的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{z}_{i3}(t) &= \dot{\alpha}_{i,2}(t) - \dot{a}_i(t) = \\ &\dot{z}_{i,1} + k_{i,1}\dot{z}_{i,1} + k_{i,2}\dot{z}_{i,2} + \\ &\ddot{\delta}_i - f_i - g_i u_i \end{aligned} \quad (30)$$

定义第三个李雅普诺夫函数:

$$V_{i3} = V_{i,2} + \frac{1}{2}z_{i,3}^2 \quad (31)$$

则其导数为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i3} &= \dot{V}_{i,2} + z_{i,3}\dot{z}_{i,3} = -k_{i,1}z_{i,1}^2 - \\ &k_{i,2}z_{i,2}^2 + z_{i,3}(z_{i,2} + \dot{z}_{i,1} + k_{i,1}\dot{z}_{i,1} + \\ &k_{i,2}\dot{z}_{i,2} + \ddot{\delta}_i - f_i - g_i u_i) \end{aligned} \quad (32)$$

设计如下反步法控制器:

$$u_i = \frac{1}{g_i}(k_{i,3}z_{i,3} + z_{i,2} + \dot{z}_{i,1} + k_{i,1}\dot{z}_{i,1} + k_{i,2}\dot{z}_{i,2} + \ddot{\delta}_i - f_i), k_{i,3} > 0 \quad (33)$$

将式 (33) 代入式 (32) 可得:

$$\dot{V}_{i3} = -k_{i,1}z_{i,1}^2 - k_{i,2}z_{i,2}^2 - k_{i,3}z_{i,3}^2 \leq 0 \quad (34)$$

进行稳定性分析前, 先引入如下引理:

引理 1. 如果 $\Omega(t)$ 是一致连续函数, $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \Omega(\tau) d\tau$ 存在且有限, 则, $t \rightarrow \infty$ 时 $\Omega(t) \rightarrow 0$.

针对系统 (31) 进行稳定性分析. 定义如下函数:

$$\Theta(t) = -\dot{V}_{i3}(t) \quad (35)$$

则 $\int_0^t \Theta(\tau) d\tau = V_{i3}(0) - V_{i3}(t)$. 由 $v_i(0) = 0$ 和 $a_i(0) = 0$ 知, $z_{i1}(0)$, $z_{i2}(0)$ 和 $z_{i3}(0)$ 均有界且与 $e_i(0)$ 相关, 即, $V_{i3}(0)$ 有界. 由式 (34) 得, $V_{i3}(t)$ 非增且有界. 因此, $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \Omega(\tau) d\tau$ 存在且有限. 由引理 1 得, 当 $t \rightarrow \infty$ 时 $\Theta(t) \rightarrow 0$. 这意味着, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $z_{i1}(t)$, $z_{i2}(t)$ 和 $z_{i3}(t)$ 均收敛于零. 从而说明, 所设计的反步法控制器可渐近稳定误差系统 (31).

2.2.3 队列稳定性分析

在上节中, 我们采用反步法设计控制器, 本节将基于上节所设计的控制器, 对车队进行队列稳定性分析.

将式 (33) 代入式 (19), 可得:

$$\begin{aligned} \dot{a}_i &= f_i(v_i, a_i) + g_i(v_i)u_i(t) = \\ &k_p(\delta_i + e_i) + k_v(\dot{\delta}_i + \dot{e}_i) + \\ &k_a(\ddot{\delta}_i + \ddot{e}_i) + \ddot{\delta}_i \end{aligned} \quad (36)$$

其中, $k_p = k_{i1} + k_{i1}k_{i2}k_{i3} + k_{i3}$, $k_v = k_{i1}k_{i2} + k_{i2}k_{i3} + k_{i1}k_{i3} + 2$, $k_a = k_{i1} + k_{i2} + k_{i3}$. 由式 $\delta_i(t) = s_{i-1}(t) - s_i(t) - d_{i,\text{ref}}$, 可得:

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

由式 (36) 和式 (37), 可得:

$$\begin{aligned} \ddot{\delta}_i &= k_p(\delta_{i-1} + e_{i-1}) + k_v(\dot{\delta}_{i-1} + \dot{e}_{i-1}) + \\ &k_a(\ddot{\delta}_{i-1} + \ddot{e}_{i-1}) + \ddot{\delta}_{i-1} - k_p(\delta_i + e_i) - \\ &k_v(\dot{\delta}_i + \dot{e}_i) - k_a(\ddot{\delta}_i + \ddot{e}_i) - \ddot{\delta}_i \end{aligned} \quad (38)$$

由 $e_{i-1} - e_i = -\delta_i$, $\dot{e}_{i-1} - \dot{e}_i = -\dot{\delta}_i$ 和 $\ddot{e}_{i-1} - \ddot{e}_i = -\ddot{\delta}_i$, 式 (38) 可写为:

$$\begin{aligned} 2\ddot{\delta}_i + 2k_p\delta_i + 2k_v\dot{\delta}_i + 2k_a\ddot{\delta}_i = \\ \ddot{\delta}_{i-1} + k_p\delta_{i-1} + k_v\dot{\delta}_{i-1} + k_a\ddot{\delta}_{i-1} \end{aligned} \quad (39)$$

式 (39) 两边取拉氏变换, 可得:

$$G_i(s) = \frac{\delta_i(s)}{\delta_{i-1}(s)} = \frac{s^3 + k_a s^2 + k_v s + k_p}{2s^3 + 2k_a s^2 + 2k_v s + 2k_p} = \frac{1}{2} \quad (40)$$

根据车队队列稳定性定义, 有:

$$|G_i(j\omega)| = \left| \frac{\delta_i(j\omega)}{\delta_{i-1}(j\omega)} \right| = \frac{1}{2} < 1 \quad (41)$$

显然, 所设计的控制器可确保车队的队列稳定性.

3 仿真

本文首先给出控制方法应用的仿真实验, 并与文献 [9] 不考虑车队油耗且领头车速度为设定值做比较, 进而得出相关结论. 然后, 给出 Arduino 车队实验, 验证所设计控制器的实用性和有效性.

3.1 数值仿真

1) 速度优化

考虑由 5 辆车组成的车队, 路况见图 3, 其由三部分组成, 包括上坡, 平路以及下坡, 上下坡坡度角分别为 3° 和 -3° . 车队中车辆质量分别为 $m_0 = 20\text{ t}$, $m_1 = 20\text{ t}$, $m_2 = 35\text{ t}$, $m_3 = 40\text{ t}$, $m_4 = 40\text{ t}$, 车辆横截面面积为 $A_0 = A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = 10\text{ m}^2$, 滚动阻力系数 $c_r = 3 \times 10^{-3}$, 空气密度 $\rho = 1.29\text{ kg/m}^3$, 风阻系数 $c_{D,0} = 0.6$, $\eta_i = 0.5$, 发动机时间常数 $\zeta_i = 0.25$. 车速限制 $v_{p,\min} = 72\text{ km/h}$, $v_{p,\max} = 90\text{ km/h}$. 油耗模型中燃空配比 $\xi = 1$, 燃料热值 $\kappa = 44$, $L = 0.2$, $M = 33$, $D = 5$, $\psi = 737$, $\eta_t = 0.9$, $\eta_{tf} = 0.4$. 滚动动态规划方法中 $\Delta T = 2\text{ s}$, $H = 6$.

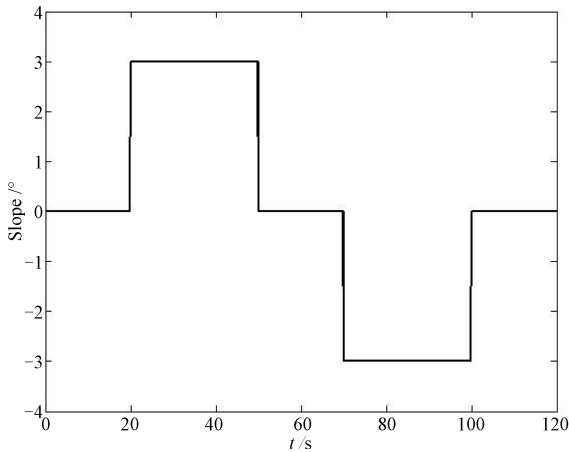


图 3 路况图

Fig. 3 Scenario of road

基于本文所建立的油耗模型, 所提供的滚动动态规划方法以及所考虑到的具体路况 (见图 3), 计算得到最优参考速度曲线见图 4. 由油耗模型 (9) 可知, 当路况为平路时, 车辆以最小速度行驶以减少功率, 从而减少油耗; 爬坡时, 车辆不可避免地需提高速度, 以保证车辆能正常行驶, 在路况由上坡切换到平路后, 车速调整到最小值并保持; 下坡路段, 由于重力的影响, 车速增加并在下坡段保持特定值直至平路段, 在平路段, 车速回到最小值. 图 4 符合此速度变化规律.

2) 速度跟踪

给定控制器参数 $k_p = 5.5$, $k_v = 9.25$, $k_a = 5$, 所得仿真结果如图 5 和图 6 所示.

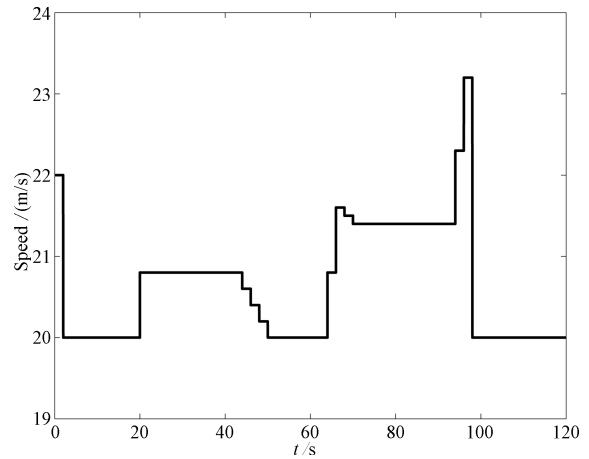


图 4 最优参考速度曲线

Fig. 4 The profile of the fuel-efficient velocity

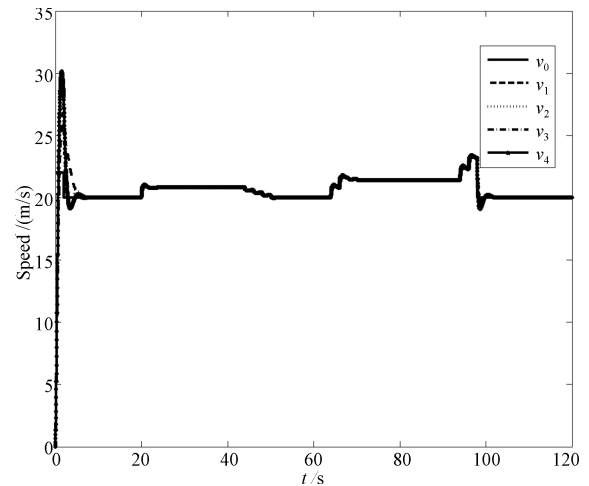


图 5 车辆速度曲线

Fig. 5 Profile of the velocity

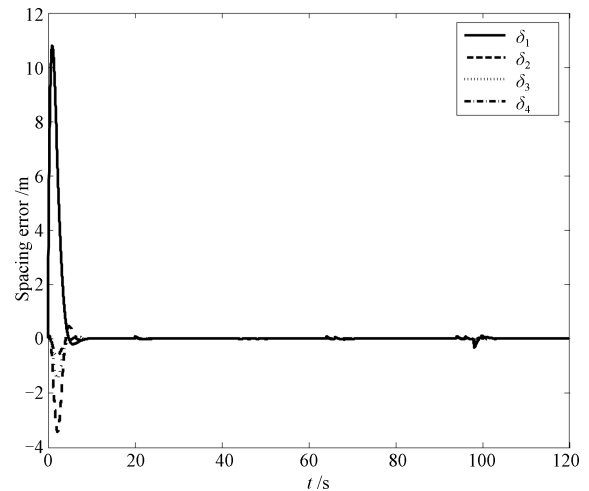


图 6 车间距误差曲线

Fig. 6 Profile of the spacing error

图 5 为每辆车的速度变化, 显然, 车辆可以较好地跟踪设定速度. 图 6 中, 所有跟随车辆与其前车的

车间距误差在 20s 内趋于一致, 达到稳定状态.

对应于本文所规划的最优参考速度曲线, 图 7 为文献 [9] 所用的设定领头车速度, 图 8 和图 9 分别为相应的速度跟踪曲线以及车间距误差曲线, 相比于图 5 和图 6, 从车队安全控制效果来看, 两者并未有明显的区别.

3) 车队油耗

表 1 给出了油耗对比, 显然, 本文提出的基于速度规划的车队节油安全控制方法比基于领头车速度设定方法在节油上有明显的优势, 节油达 20.21%, 并且如果设定的速度不太合理, 这个数据可能会更大.

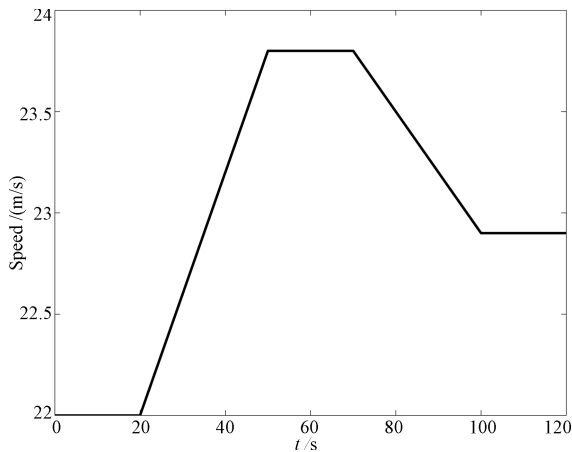


图 7 领头车速度曲线

Fig. 7 Profile of the leader's velocity

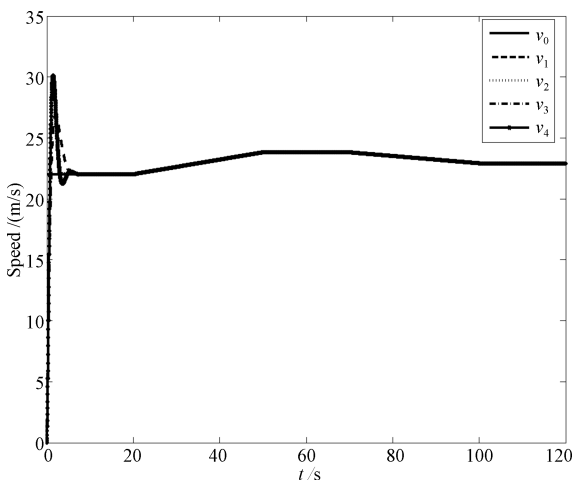


图 8 车辆速度曲线

Fig. 8 Profile of the velocity

另外, 从数据可得, 同重量的情况下, 紧跟随领头车的车辆相比于领头车节油 36.6%, 如车 1 与车 0, 可见编队在节油方面的优势; 同为跟随车时, 同重量的车辆油耗几乎相同, 如车 3 和车 4, 不同重量的车辆, 尽管为跟随车, 相较于其前车油耗仍会增大, 如车辆 3 和 2, 可见, 车辆重量对油耗有明显的影响.

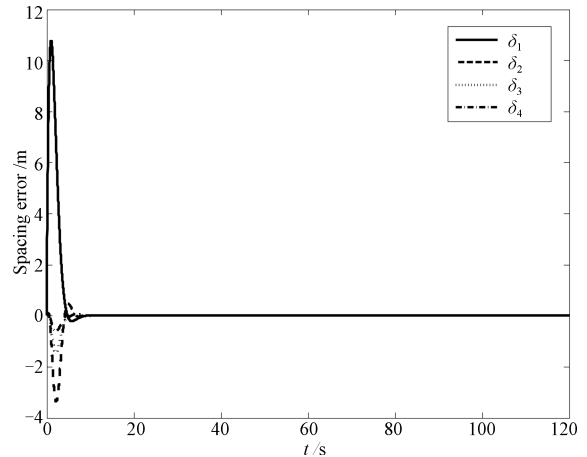


图 9 车间距误差曲线

Fig. 9 Profile of the spacing error

表 1 油耗对比

Table 1 Comparison on fuel consumed

第 i 辆车, 车重	基于速度规划的油耗 (mL)	基于速度设定的油耗 ^[9] (mL)
0, 20 t	476.7	625.4
1, 20 t	302.3	384.1
2, 35 t	396.2	488.5
3, 40 t	427.7	523.4
4, 40 t	427.6	523.3
总油耗	2030.5	2544.7

3.2 Arduino 车队实验

为了验证本文所设计控制器的实际应用情况, 针对 4 辆由 Arduino 芯片为核心控制器设计的智能小车组成的车队进行实验, 验证控制器的实用性和有效性, 实验场景见图 10. 小车前端增加的两个红外传感器, 用于测量车辆之间的距离. 后轮和顶部安装了增量编码器和三轴加速度传感器用于测量车辆的速度和加速度, 小车的后上部安装无线传输模块, 用来发送编码器和加速度器测量的信息.

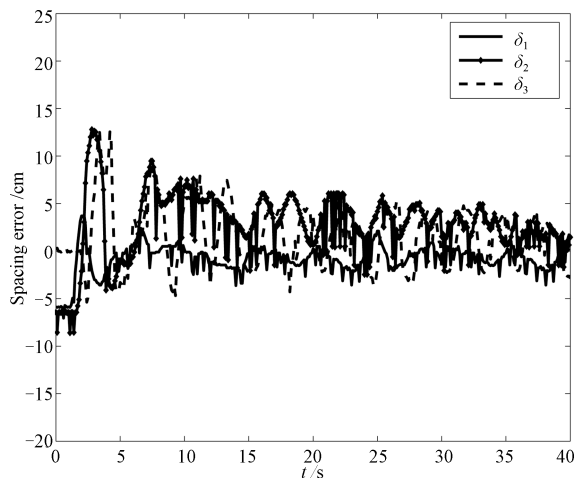


图 10 Arduino 车队实验

Fig. 10 Arduino platoon in the experiment

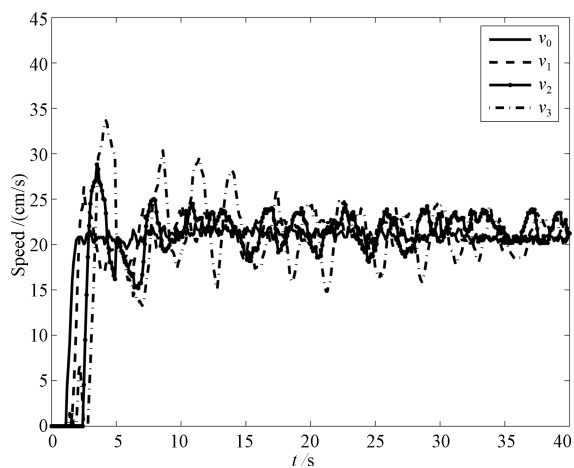
从图 11 (a) 和 (b) 可以看到, 车队启动时车间距较大, 且之后会有较大的超调, 这是实验小车的起

动电压较高导致的. 实验时对此做了校正, 跟随车的车间距最终基本稳定在可接受范围内, 速度跟踪效果良好, 车队能够保持队列稳定性.



(a) 车间距误差

(a) Spacing error



(b) 速度

(b) Velocity

图 11 Arduino 小车实验

Fig. 11 Arduino car experiments

4 结论

本文研究了车队的节油及安全控制, 将油耗问题融入到车队控制中, 提出协同控制结构. 采用滚动时域动态规划方法, 得到车队最优参考速度; 通过设计非线性跟踪控制器并进行车队队列稳定性分析, 实现车队的节油安全控制.

需要指出的是, 本文未考虑车队路径规划等运行优化问题, 这部分内容很可能对车队节油有所裨益, 我们将来的研究中会充分考虑路况, 探讨车队油耗最优的路径规划和运行优化等问题. 另外, 实际中车辆协同控制时的信息反馈和控制动作存在一定滞

后, 本文的理论研究和实验中并未考虑时滞问题, 这也将是我们未来拟解决的重要问题.

References

- 1 Alam A. Fuel-Efficient Heavy-Duty Vehicle Platooning [Ph. D. dissertation], KTH Royal Institute of Technology, 2014.
- 2 European Commission. *EU Transport in Figures-Statistical Pocketbook*. Luxembourg: European Commission, 2014.
- 3 Shladover S E. PATH at 20-history and major milestones. In: *Proceedings of the 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. Toronto, Canada: IEEE, 2006. 1-22-1-29
- 4 Hellström E, Åslund J, Nielsen L. Design of an efficient algorithm for fuel-optimal look-ahead control. *Control Engineering Practice*, 2010, **18**(11): 1318-1327
- 5 Bonnet C, Fritz H. Fuel consumption reduction in a platoon: experimental results with two electronically coupled trucks at close spacing. In: *Proceedings of the Future Transportation Technology Conference & Exposition*. Costa Mesa, USA, 2000.
- 6 Al Alam A, Gattami A, Johansson K H. An experimental study on the fuel reduction potential of heavy duty vehicle platooning. In: *Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. Funchal: IEEE, 2010. 306-311
- 7 Shladover S E. Longitudinal control of automotive vehicles in close-formation platoons. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1991, **113**(2): 231-241
- 8 Dolk V S, Ploeg J, Heemels W P M H. Event-triggered control for string-stable vehicle platooning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, **18**(12): 3486-3500
- 9 Stankovic S S, Stanojevic M J, Siljak D D. Decentralized overlapping control of a platoon of vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000, **8**(5): 816-832
- 10 Guo G, Yue W. Autonomous platoon control allowing range-limited sensors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, **61**(7): 2901-2912
- 11 Yue W, Wang L Y, Guo G. Event-triggered platoon control of vehicles with time-varying delay and probabilistic faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, **87**: 96-117
- 12 Wang Q, Guo G, Cai B B. Distributed receding horizon control for fuel-efficient and safe vehicle platooning. *Science China Technological Sciences*, 2016, **59**(12): 1953-1962
- 13 Wang C, Nijmeijer H. String stable heterogeneous vehicle platoon using cooperative adaptive cruise control. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Las Palmas, Spain: IEEE, 2015. 1977-1982
- 14 Zheng Y, Li S E, Wang J Q, Cao D P, Li K Q. Stability and scalability of homogeneous vehicular platoon: study on the influence of information flow topologies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(1): 14-26

- 15 Guo X G, Wang J L, Liao F, Teo R S H. Distributed adaptive integrated-sliding-mode controller synthesis for string stability of vehicle platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(9): 2419–2429
- 16 Harfouch Y A, Yuan S, Baldi S. An adaptive switched control approach to heterogeneous platooning with inter-vehicle communication losses. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2017, DOI: 10.1109/TCNS.2017.2718359
- 17 Tian Tao-Tao, Hou Zhong-Sheng, Liu Shi-Da, Deng Zhi-Dong. Model-free adaptive control based lateral control of self-driving car. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(11): 1931–1940
(田涛涛, 侯忠生, 刘世达, 邓志东. 基于无模型自适应控制的无人驾驶汽车横向控制方法. *自动化学报*, 2017, **43**(11): 1931–1940)
- 18 Sun Jing-Liang, Liu Chun-Sheng. An overview on the adaptive dynamic programming based missile guidance law. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(7): 1101–1113
(孙景亮, 刘春生. 基于自适应动态规划的导弹制导律研究综述. *自动化学报*, 2017, **43**(7): 1101–1113)
- 19 Schwarzkopf A B, Leipnik R B. Control of highway vehicles for minimum fuel consumption over varying terrain. *Transportation Research*, 1977, **11**(4): 279–286
- 20 Hooker J N. Optimal driving for single-vehicle fuel economy. *Transportation Research, Part A: General*, 1988, **22**(3): 183–201
- 21 Hellström E, Åslund J, Nielsen L. Design of a well-behaved algorithm for on-board look-ahead control. *IFAC Proceedings of Volumes*, 2008, **41**(2): 3350–3355
- 22 Van Mierlo J, Maggetto G, Van de Burgwal E, Gense R. Driving style and traffic measures-influence on vehicle emissions and fuel consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2004, **218**(1): 43–50
- 23 Taniguchi M. Eco-driving and fuel economy of passenger cars. In: *Proceedings of the Annual Meeting of IEE Japan*. IEE, 2008. S215–S218
- 24 Kamal M A S, Mukai M, Murata J, Kawabe T. Ecological driver assistance system using model-based anticipation of vehicle-road-traffic information. *IET Intelligent Transport Systems*, 2010, **4**(4): 244–251
- 25 Ding Jin-Liang, Yang Cui-E, Chen Li-Peng, Chai Tian-You. Dynamic multi-objective optimization algorithm based on reference point prediction. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(2): 313–320
(丁进良, 杨翠娥, 陈立鹏, 柴天佑. 基于参考点预测的动态多目标优化算法. *自动化学报*, 2017, **43**(2): 313–320)
- 26 Kamal M A S, Mukai M, Murata J, Kawabe T. Ecological vehicle control on roads with up-down slopes. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, **12**(3): 783–794
- 27 Kamal A S, Mukai M, Murata J, Kawabe T. Model predictive control of vehicles on urban roads for improved fuel economy. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, **21**(3): 831–841
- 28 Zhang B, Gao Z Y, Guo G. Fuel optimal vehicle control via traffic light prediction. In: *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference*. Dalian, China: IEEE, 2017. 10004–10009
- 29 Goeke D, Schneider M. Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research*, 2015, **245**(1): 81–99



王 琼 大连理工大学控制理论与控制工程专业博士. 主要研究方向为车辆协作控制技术.

E-mail: wangqiong0705@163.com

(WANG Qiong Ph.D. candidate in control theory and control engineering, Dalian University of Technology. Her main research interest is vehicle cooperative control technology.)



郭 戈 东北大学教授. 1998 年获得东北大学控制理论与控制工程专业博士学位. 主要研究方向为智能交通系统, 运动目标检测跟踪网络. 本文通信作者.

E-mail: geguo@yeah.net

(GUO Ge Professor at Northeastern University. He received his Ph.D. degree from Northeastern University in

1998. His research interest covers intelligent transportation system, moving target detection and tracking with network. Corresponding author of this paper.)