

# 空气流动阻力下非线性车辆队列 最优能耗控制方法

闫茂德, 杜正源, 左 磊

(长安大学 电子与控制工程学院, 西安 710064)

**摘要:** 为了优化车辆队列在长距离行驶过程中的能源消耗, 对空气流动阻力下车辆队列能耗优化间距策略以及相应的队列控制方法进行了研究; 首先根据车辆队列在行驶过程中受到的空气流动阻力, 建立基于异构风阻系数的车辆动力学模型; 其次, 设计基于滑模控制的非线性车辆队列控制方法, 使其能够在不同风阻系数下稳定地收敛到期望的车辆队列; 在此基础上, 构建稳态下车辆队列能量消耗评价模型, 并通过优化分析, 计算能量消耗最优下的车辆队列期望车间距; 最后通过数值仿真的手段验证所提控制方法的有效性与可行性; 该结果表明: 所设计的控制器能够使整个车辆队列达到期望的控制效果; 得到的最优车间距能够使得特定条件下车辆队列稳态能量消耗降低。

**关键词:** 车辆队列控制; 风阻系数; 车辆间距; 能量消耗; 队列稳定

## Optimal Energy Consumption Control for Nonlinear Vehicle Platoon with Air Flow Resistance

YAN Maode, DU Zhengyuan, ZUO Lei

(College of Electrical Control Engineering, Changan University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to optimize the energy consumption of vehicle platoon during long-distance driving, the strategy of optimizing the energy consumption of the vehicle platoon with the air flow resistance and the related platoon control method are studied. Firstly, according to the air flow resistance of the vehicle platoon during the driving process, a vehicle dynamics model based on heterogeneous drag coefficients is established. Then, a nonlinear vehicle platoon control method based on sliding mode control is designed, so that it can stably converge to the desired vehicle platoon under different drag coefficients. On this basis, a steady-state vehicle platoon energy consumption evaluation model is constructed, and the expected distance between vehicles with the optimal energy consumption of the vehicle platoon is calculated by means of optimization analysis. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed control method are verified by means of numerical simulation. The results show that the designed controller can make the whole vehicle platoon achieve the desired control effect; the optimal vehicle spacing can reduce the steady-state energy consumption of vehicle queue under specific conditions.

**Keywords:** vehicle platoon control; drag coefficient; vehicle spacing headway; energy consumption; string stability

收稿日期: 2021-06-01; 修回日期: 2021-07-12。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51909008, 61803040); 中国博士后科学基金面向项目(2021M692740)。

作者简介: 闫茂德(1974-), 男, 陕西澄城人, 博士, 教授, 主要从事自主车辆队列控制及多移动机器人编队控制等研究。

通讯作者: 左 磊(1989-), 男, 陕西西安人, 博士, 副教授, 主要从事多智能体协同控制, 车路协同控制、模型预测控制等方向的研究。

引用格式: 闫茂德, 杜正源, 左 磊. 空气流动阻力下非线性车辆队列最优能耗控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 98-105.

## 0 引言

近年来, 智能交通系统受到了社会各界的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。车辆队列作为智能交通系统中的一个重要组成部分, 可有效提高道路使用率、降低能源消耗, 尤其是当车辆高速行驶时, 空气阻力急剧增加, 导致车辆大约有 50% 的燃料消耗需要用于克服空气阻力<sup>[4]</sup>。因此, 研究空气流动阻力下的车辆队列控制方法, 对促进智能交通的发展以及降低车辆能量消耗具有重要意义。

在车辆队列控制领域, 许多学者针对如何控制车辆来减少能量消耗开展了多方面研究。文献 [5-6] 通过获得交通信息, 结合车辆动力学和经济性能要求, 提出了城市路况下车辆行驶控制策略, 可有效提升燃油经济性。文献 [7] 针对时变的多目标控制问题, 提出了一种实时权值调整策略, 降低了车辆燃油消耗。文献 [8] 考虑道路坡度对车辆能量消耗的影响, 提出一种快速优化的非线性模型预测控制方法。这些研究着重考虑不同因素对能量消耗的影响, 提出了相应的解决方案, 在一定程度上降低了车辆队列的能量消耗。

然而, 上述研究提出的控制方案没有考虑空气流动阻力对车辆队列的差异性影响。当车辆采用队列行驶时, 由于车间距离缩短, 后车进入前车的尾流区, 两辆车的流场发生相互干扰, 空气流动阻力的参数会发生变化<sup>[9]</sup>。文献 [10-14] 采用风洞试验及数值模拟方法, 说明了队列行驶时, 每辆车的风阻系数会随车辆间距的变化而发生改变。

为了使车辆队列达到期望车间距, 众多先进控制方法被应用于车辆队列控制中, 其中滑模控制由于其较强的鲁棒性受到广泛使用。文献 [15] 针对自适应巡航控制中存在的问题, 提出一种自适应滑模控制方法。文献 [16] 考虑车辆的外部干扰因素, 结合扰动观测器提出了一种整体滑模控制策略。文献 [17-20] 采用耦合滑模面设计自适应滑模控制器, 保证了队列稳定性。现有的滑模控制算法能够使车辆队列达到期望的控制效果, 但在设计时并未考虑空气流动阻力的车辆动力学模型。

基于以上分析, 本文研究空气流动阻力下车辆队列最优能耗控制问题, 主要贡献包括: (1) 分析空气流动阻力下车辆队列中每辆车的动力学模型及其相互作用关系, 建立基于异构风阻系数的非线性车辆动力

学模型。(2) 通过 Lyapunov 方法设计了滑模控制器, 并证明所设计车辆队列系统的稳定性与可行性。(3) 构建稳态下车辆队列的能量消耗评价模型, 并通过优化分析的方式, 计算稳态下车辆队列能量消耗最优的期望车间距。最后通过数值仿真的手段验证了所提控制方法的有效性与可行性。

## 1 系统模型与问题描述

### 1.1 空气流动阻力下车辆队列动力学模型

车辆的尾涡是产生空气阻力的主要原因, 队列行驶时由于不同位置车辆的尾涡状况不同, 导致其风阻系数不同。图 1 为车辆队列行驶时不同位置车辆的风阻系数随车辆间距变化曲线<sup>[21]</sup>。

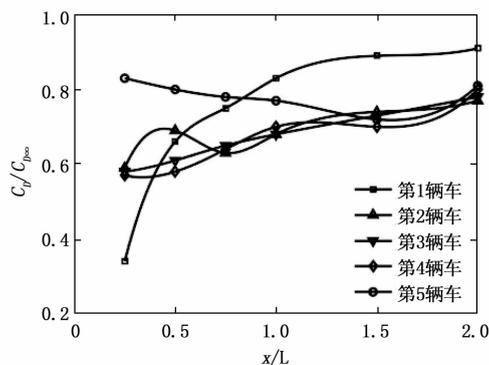


图 1 车辆风阻系数随车辆间距变化曲线

图 1 中, 横坐标为车辆间距与车长的比值, 纵坐标为车辆实际风阻系数与单车行驶时风阻系数的比值, 不同曲线代表车辆队列中不同位置的车辆。由图 1 可知, 头车和尾车的风阻系数随车辆间距变化趋势与其他车辆不同, 因此采用不同的函数进行拟合, 具体如下:

$$C_{di} = \begin{cases} \left( a_{i0} \frac{d_i^2}{L^2} + a_{i1} d_i + a_{i2} \right) C_{d\infty}, & i = 0, N \\ \left( b_0 \frac{d_i}{L} + b_1 \right) C_{d\infty}, & i = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $C_{di}$  为队列中第  $i$  辆车的实际风阻系数,  $C_{d\infty}$  为单车行驶时的风阻系数,  $d_i$  为车辆队列的间距,  $L$  为车长。

考虑由  $N+1$  辆相同阶背式轿车构成的车辆队列, 并标记这些车辆为  $0, \dots, N$ , 其中  $0$  表示领航车,  $1, \dots, N$  表示跟随车辆, 每辆车的动力学模型

表示为:

$$\begin{cases} \dot{r}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) - g(d_i)v_i^2(t) - f \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中  $u_i(t)$  为第  $i$  辆车的系统控制输入。 $m, r_i(t)$  和  $v_i(t)$  分别为当前车辆的质量、位置和速度。 $g(d_i) = \frac{\rho A C_{d_i}}{2m}$ , 其中  $\rho$  为空气质量密度,  $A$  为车辆横截面积,  $C_{d_i}$  为当前车辆的空气阻力系数, 与车辆间距  $d_i$  相关。 $f = \frac{p_m}{m}$ , 其中  $p_m$  为车辆所受机械阻力。

车辆队列通信拓扑结构及每辆车所受空气阻力情况如图 2 所示。

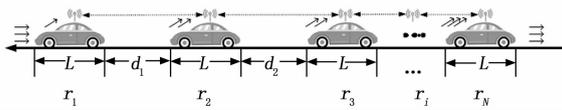


图 2 车辆队列通信拓扑及空气阻力示意图

图 2 中, 每辆车左前方的箭头表示车辆受到的空气阻力, 箭头的数量表示空气阻力的大小。由图 2 可知, 车辆队列行驶时, 头车和尾车与其他车辆的风阻系数随车辆间距变化特性不同, 导致其所受空气阻力不同, 即动力学模型为异构非线性。车辆之间的通信拓扑结构是双向的, 所有车辆之间通过无线通信方式 (V2V、5G 等) 共享各自的运动状态信息 (如位置、速度等)。

### 1.2 问题描述

车辆的位置误差  $e_i(t)$  表示为:

$$e_i(t) = r_{i-1}(t) - r_i(t) - L - d^* \quad i = 1, 2, \dots, N$$

其中:  $d^*$  为期望车辆间距。

车辆的速度误差  $\dot{e}_i(t)$  表示为:

$$\dot{e}_i(t) = v_{i-1}(t) - v_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, N$$

在此基础上, 根据式 (2) 中的动力学模型, 车辆队列的控制目标表述如下:

1) 车辆收敛性: 车辆队列中每辆车的位置误差及速度误差能够渐进收敛至零, 即:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} |e_i(t)| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |\dot{e}_i(t)| = 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

2) 队列稳定性: 当出现速度波动等扰动时, 队列误差不向上游车辆放大传播, 即:

$$|G_i(\nabla)| = \left| \frac{E_{i+1}(\nabla)}{E_i(\nabla)} \right| \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, N$$

其中:  $\nabla$  为拉普拉斯算子,  $G_i(\nabla)$  表示队列误差传递函数,  $E_{i+1}(\nabla)$  和  $E_i(\nabla)$  分别表示  $e_{i+1}(t)$  和  $e_i(t)$  的拉普拉斯变换。

### 2 基于滑模的车辆队列控制

在本节, 设计基于滑模的非线性车辆队列控制方法, 确保车辆的收敛性及队列稳定性。

首先, 设计滑模面:

$$s_i(t) = ce_i(t) + e'^i_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中:  $c > 0$ 。

为了保证队列稳定性, 构建耦合滑模面:

$$S_i(t) = \begin{cases} \beta_i s_i(t) - s_{i+1}(t) & i = 1, 2, \dots, N-1 \\ \beta_i s_i(t) & i = N \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $0 < \beta_i \leq 1$  为耦合滑模面的耦合系数。

$S_i(t)$  与  $s_i(t)$  的关系可表示为:

$$\mathbf{S}(t) = \mathbf{B}\mathbf{s}(t)$$

其中:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \beta_1 & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \beta_{N-1} & -1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \beta_N \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t) \quad s_2(t) \quad \cdots \quad s_N(t)]^T$$

$$\mathbf{S}(t) = [S_1(t) \quad S_2(t) \quad \cdots \quad S_N(t)]^T$$

由于  $\forall i \in \{1, N\}, 0 < \beta_i \leq 1$ , 且  $\mathbf{B}$  为非奇异矩阵, 因此  $\lim_{s_i(t) \rightarrow 0} s_i(t) = 0$ 。

当  $i = 1, 2, \dots, N-1$  时, 对  $S_i(t)$  求导得:

$$\begin{aligned} \dot{S}_i(t) &= \beta_i \dot{s}_i(t) - \dot{s}_{i+1}(t) = \\ &= -(\beta_i + 1)(u_i(t) - g(d_i)v_i^2(t) - f) + D_i(t) \end{aligned}$$

其中:  $D_i(t) = \beta_i c \dot{e}_i(t) - c \dot{e}_{i+1}(t) + \beta_i \ddot{r}_{i-1}(t) + \ddot{r}_{i+1}(t)$ 。

当  $i = N$  时, 对  $S_N(t)$  求导得:

$$\begin{aligned} \dot{S}_N(t) &= \beta_N \dot{s}_N(t) = \\ &= -\beta_N(u_N(t) - g(d_N)v_N^2(t) - f) + D_N(t) \end{aligned}$$

其中:  $D_N(t) = \beta_N c \dot{e}_N(t) + \beta_N \ddot{r}_{N-1}(t)$ 。

基于以上分析, 对第  $i = 1, 2, \dots, N-1$  辆车设计控制律为:

$$u_i(t) = \frac{k_i S_i(t)}{\beta_i + 1} + g(d_i)v_i^2(t) + f + \frac{D_i(t)}{\beta_i + 1} \quad (5)$$

对第  $N$  辆车设计控制律为:

$$u_N(t) = \frac{k_N S_N(t)}{\beta_N} + g(d_N) v_N^2(t) + f + \frac{D_N(t)}{\beta_N} \quad (6)$$

其中:  $k_i > 0$ 。

定理 1: 考虑由  $N$  辆车组成的车辆队列, 其动力学模型由式 (2) 所描述。则在式 (5) ~ (6) 所设计控制律的作用下, 其中参数满足  $c > 0, 0 < \beta_i \leq 1, k_i > 0$ , 车辆队列能够稳定地收敛到期望的队列状态。

证明: 设计如下 Lyapunov 函数:

$$V(t) = \sum_{i=1}^N V_i(t) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} S_i^2(t)$$

对  $V(t)$  求导得:

$$\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^N S_i(t) \dot{S}_i(t) \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (8) 得:

$$\dot{V}(t) = \sum_{i=1}^N S_i(t) \dot{S}_i(t) = \sum_{i=1}^N -k_i S_i^2(t) \leq 0 \quad (8)$$

根据式 (8) 可知,  $\dot{V}(t)$  为半负定, 因此  $V(t)$  不是渐进增加的且为有界值, 且  $S_i, \dot{S}_i$  均为有界值。

对  $\dot{V}(t)$  求导可得  $\ddot{V}(t) = \sum_{i=1}^N -k_i \dot{S}_i(t) S_i(t)$ ,

$\dot{V}(t)$  存在且有界, 因此  $\dot{V}(t)$  连续, 根据 Barbalat 引理可知,  $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}(t) \rightarrow 0$ , 又有  $k_i > 0, 0 < \beta_i \leq 1$ , 则  $\lim_{t \rightarrow \infty} S_i(t) \rightarrow 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{S}_i(t) \rightarrow 0$ 。

对于车辆队列稳定性, 通过限定前后车关于位置误差的拉普拉斯变换的比率来保证。具体地, 由于  $S_i(t) = \beta_i s_i(t) - s_{i+1}(t)$ , 则有:

$$\beta_i (\dot{e}_i(t) + c e_i(t)) = \dot{e}_{i+1}(t) + c e_{i+1}(t) \quad (9)$$

对式 (9) 进行拉普拉斯变换, 则有:

$$\beta_i (s E_i(\nabla) + c E_i(\nabla)) = s E_{i+1}(\nabla) + c E_{i+1}(\nabla) \quad (10)$$

式 (10) 可变为:

$$\frac{E_{i+1}(\nabla)}{E_i(\nabla)} = \beta_i$$

由于  $\beta_i$  满足  $0 < \beta_i \leq 1$ 。可以保证车辆位置误差不会传递, 队列稳定性得到保证。

### 3 稳态下车辆队列能耗优化

在本节, 构建了车辆队列能量消耗评价模型, 定义了稳态条件, 得到稳态下的控制律及能量消耗评价函数, 并通过优化分析, 计算使车辆队列能量消耗最优的期望车间距。

首先, 定义车辆队列能量消耗评价模型:

$$J(d) = \sum_{i=1}^N J_i(d) = \sum_{i=1}^N u_i^2 \quad (11)$$

假设系统在  $T$  时刻达到稳态, 考虑领航车轨迹为匀速直线运动。即当  $t > T$  时, 车辆稳态间距为  $d_s, v_i = v_L, \dot{r} = 0$ 。在实际控制过程中, 考虑误差的存在, 定义稳态下存在有界位置误差  $|e_i| \leq e_{\max}$ , 则  $d_i = d^* + e_{\max}$ 。

在此基础上, 稳态下的控制律可表示为:

$$u_{is} = \frac{k_i S_i}{\beta_i + 1} + g(d_s) v_L^2 + f + \frac{D_i}{\beta_i + 1} = \left( \frac{\rho A v_L^2 b_0 C_{d\infty}}{2mL} \right) d_s + \frac{\beta_i - 1}{\beta_i + 1} k_i c e_{\max} + \frac{\rho A v_L^2 b_1 C_{d\infty}}{2m} + \frac{p_m}{m} \quad (12)$$

其中:  $i = 1, 2, \dots, N-1$ 。

对于最后一辆车:

$$u_{Ns} = \frac{k_N S_N}{\beta_N} + g(d_s) v_L^2 + f + \frac{D_N}{\beta_N} = \left( \frac{\rho A v_L^2 a_0 C_{d\infty}}{2mL^2} \right) d_s^2 + \left( \frac{\rho A v_L^2 a_1 C_{d\infty}}{2mL} \right) d_s + k_N c e_{\max} + \frac{\rho A v_L^2 a_2 C_{d\infty}}{2m} + \frac{p_m}{m} \quad (13)$$

对控制律进行化简, 当  $i = 1, 2, \dots, N-1$  时, 令:

$$h_i = \frac{\rho A v_L^2 b_0 C_{d\infty}}{2mL}$$

$$l_i = \frac{\beta_i - 1}{\beta_i + 1} k_i c e_{\max} + \frac{\rho A v_L^2 b_1 C_{d\infty}}{2m} + \frac{p_m}{m}$$

当  $i = N$  时:

$$r_N = \frac{\rho A v_L^2 a_0 C_{d\infty}}{2mL^2}$$

$$h_N = \frac{\rho A v_L^2 a_1 C_{d\infty}}{2mL}$$

$$l_N = k_N c e_{\max} + \frac{\rho A v_L^2 a_2 C_{d\infty}}{2m} + \frac{p_m}{m}$$

将式 (12) ~ (13) 代入式 (11), 得到稳态下车辆队列能量消耗评价模型:

$$J(d_s) = \sum_{i=1}^N J_i(d_s) = \sum_{i=1}^N u_{is}^2 = r_N^2 d_s^4 + 2r_N h_N d_s^3 + \left( \sum_{i=1}^N h_i^2 + 2r_N l_N \right) d_s^2 + \left( \sum_{i=1}^N 2h_i l_i \right) d_s + \sum_{i=1}^N l_i^2$$

对  $J(d_s)$  求导得:

$$\dot{J}(d_s) = 4r_N^2 d_s^3 + 6r_N h_N d_s^2 +$$

$$2 \left( \sum_{i=1}^N h_i^2 + 2r_N l_N \right) d_s + \sum_{i=1}^N 2h_i l_i$$

令  $J(d_s) = 0$ , 根据盛金判别法:

$$\Delta = B^2 - 4AC$$

$$A = 36(r_N h_N)^2 - 24r_N^2 \left( \sum_{i=1}^N h_i^2 + 2r_N l_N \right)$$

$$B = 12r_N h_N \left( \sum_{i=1}^N h_i^2 + 2r_N l_N \right) - 36r_N^2 \sum_{i=1}^N 2h_i l_i$$

$$C = 4 \left( \sum_{i=1}^N h_i^2 + 2r_N l_N \right)^2 - 18r_N h_N \sum_{i=1}^N 2h_i l_i$$

当参数选择为  $c > 0, 0 < \beta_i \leq 1, k_i > 0$  时, 可得

$\Delta < 0$ , 即方程存在三个不相同的实根  $d_{s1}, d_{s2}, d_{s3}$ 。

定义车辆间最小安全距离为  $d_{safe}$ 。当车辆队列间距在  $[d_{safe}, 2L]$  范围内时, 对于能量消耗影响较大, 因此对方程的根进行以下讨论:

情况 1:  $d_{s1}, d_{s2}, d_{s3} \notin [d_{safe}, 2L]$ 。

此时,  $J(d_s)$  在  $[d_{safe}, 2L]$  内单调, 计算  $d_s$  分别位于  $d_{safe}$  和  $2L$  处的  $J(d_s)$  值, 得到局部最优解。

情况 2:  $\exists \{d_{s1}, d_{s2}, d_{s3}\} \in [d_{safe}, 2L]$ 。

此时, 判断出位于  $[d_{safe}, 2L]$  中两个根的极小值点, 计算  $d_s$  分别位于  $d_{safe}, 2L$  和极小值点处的  $J(d_s)$  值, 得到局部最优解。

情况 3:  $\exists \{d_{s1}, d_{s2}, d_{s3}\} \in [d_{safe}, 2L]$ 。

此时, 首先判断出位于  $[d_{safe}, 2L]$  中的根是否为极小值点, 若该根为极小值点, 则计算  $d_s$  分别位于  $d_{safe}, 2L$  和极小值点处的  $J(d_s)$  值, 得到局部最优解; 若根不为极小值点, 则计算  $d_s$  分别位于  $d_{safe}$  和  $2L$  处的  $J(d_s)$  值, 得到局部最优解。

情况 4:  $d_{s1}, d_{s2}, d_{s3} \in [d_{safe}, 2L]$ 。

此时, 判断出  $d_{s1}, d_{s2}, d_{s3}$  中的极小值点, 计算  $d_s$  分别位于  $d_{safe}, 2L$  和极小值点处的  $J(d_s)$  值, 得到最优解。

### 4 仿真验证

考虑一组 5 车队列, 包含 1 辆领航车和 4 辆跟随车。车辆动力学模型参数如表 1 所示。

表 1 车辆动力学模型参数

参数	值	单位
单车质量 $m$	2 000	kg
车长 $L$	5	m
空气密度 $\rho$	1.29	kg/m <sup>3</sup>
迎风面积 $A$	2	m <sup>2</sup>
车辆机械阻力 $p_m$	5	N
单车行驶风阻系数 $C_{d\infty}$	0.277 4	—

车辆队列中每辆车的风阻系数与车辆间距之间的关系如表 2 所示<sup>[21]</sup>。

表 2 五车队列风阻系数与车辆间距之间的关系

车辆	车辆间距					
	0.25L	0.5L	0.75L	L	1.5L	2L
1	0.34	0.66	0.75	0.83	0.89	0.91
2	0.59	0.69	0.63	0.68	0.74	0.77
3	0.58	0.61	0.65	0.68	0.73	0.78
4	0.57	0.58	0.64	0.70	0.70	0.80
5	0.83	0.80	0.78	0.77	0.72	0.81

将表 2 中的数据按照式 (1) 的形式采用最小二乘法进行拟合, 拟合结果为:

$$C_{di} = \begin{cases} \left(-0.31 \frac{d_i^2}{L^2} + 0.98d_i + 0.17\right)C_{d\infty} & i = 0 \\ \left(0.11 \frac{d_i}{L} + 0.57\right)C_{d\infty} & i = 1, 2, 3 \\ \left(0.09 \frac{d_i^2}{L^2} - 0.23d_i + 0.89\right)C_{d\infty} & i = 4 \end{cases}$$

设定领航车的初始位置为  $r_0 = 0$ , 领航车的速度为  $v_0 = 5$  m/s, 跟随车辆的初始位置为  $r(0) = [-18.404, -35.014, -52.853, -66.279]^T$  m, 跟随车辆的初始速度为  $v(0) = [0, 0, 0, 0]^T$  m/s。控制器参数为  $c = 0.3, \beta_i = 0.85, k_i = 3$ 。期望车辆间距设置为  $d^* = 7$  m, 最小安全距离为  $d_{safe} = 2.5$  m, 稳态位置误差限界为  $e_{max} = 0.05$  m。仿真结果如图 3 ~ 10 所示。

图 3 为车辆位置随时间变化曲线, 由图 3 可知, 队列中每辆车最终都能够稳定地跟踪领航车且不会发生碰撞, 保证了安全性。图 4 为车辆位置误差随时间变化曲线, 可以看到任意两车之间的位置误差最终都能够收敛至稳态位置误差限界内, 表示整个车辆队列最终能够达到期望的车辆间距, 队列稳定性能够得到保证。

图 5 为车辆速度随时间变化曲线。由图 5 可知, 所有跟随车辆的速度最终能够趋于领航车的速度, 保证了车辆稳定性。图 6 为车辆速度误差随时间变化曲线。由图 6 可知, 任意两车之间的速度误差最终趋于 0, 即在式 (5) ~ (6) 设计的控制律的作用下, 整个车辆队列最终会达到稳定, 保证了车辆收敛性及队列稳定性。

图 7 为滑模面随时间变化曲线。由图 7 可知,

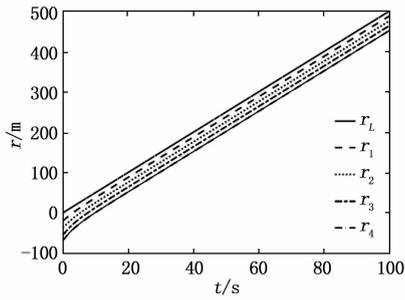


图 3 车辆位置曲线

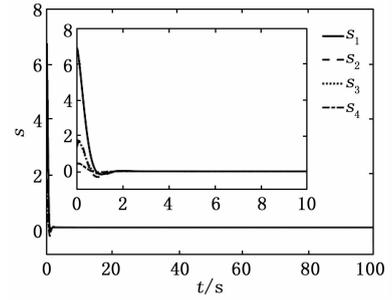


图 7 滑模面曲线

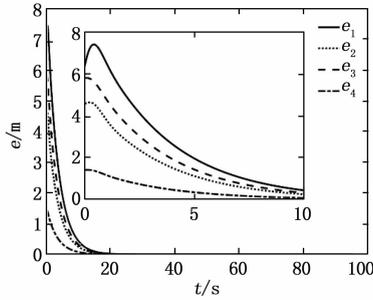


图 4 车辆位置误差曲线

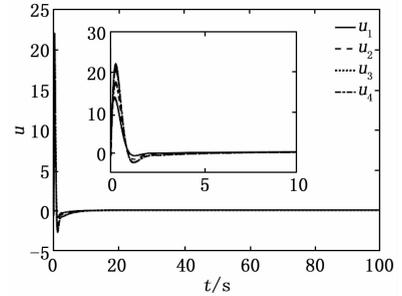


图 8 车辆控制输入曲线

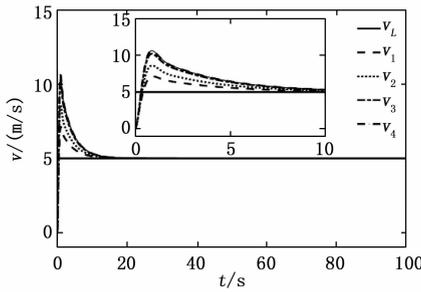


图 5 车辆速度曲线

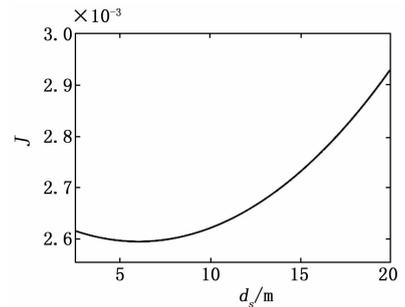


图 9 能量消耗函数曲线

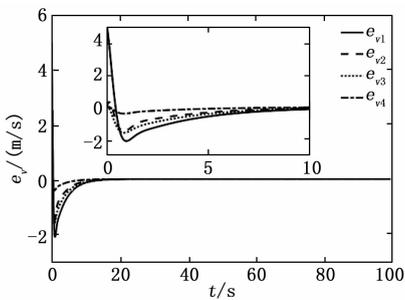


图 6 车辆速度误差曲线

$S_i(t)$  能够到达滑模面  $S_i(t) = 0$ , 且没有抖振情况出现。图 8 为车辆控制输入随时间变化曲线。从图 8 中可以看到车辆的控制输入最终趋于稳定, 说明了本文所设计的控制算法的收敛性与可行性。

基于以上的参数设置, 在  $d_s \in [2.5, 20]$  m 范围内, 能量消耗随稳态车辆间距变化曲线如图 9 所示。

其中, 横坐标表示稳态间距, 纵坐标表示能量消耗量。可以看到, 能量消耗函数在  $d_s \in [2.5, 20]$  m 内存在极小值, 通过求解得到极小值点位于  $d_s = 6$  m, 稳态时位置误差限值为  $e_{\max} = 0.05$  m, 即此时期望间距  $d^* = d_s - e_{\max} = 5.95$  m。

不同期望间距下能量消耗对比结果如图 10 所示。其中, 横坐标为时间, 纵坐标为能量消耗量, 不同曲线表示不同期望间距下的稳态能量消耗。给出了当期望间距  $d^*$  分别为 4 m、5 m、5.95 m、7 m、8 m、9 m 时的能量消耗值。由图 10 可知, 期望间距设置不同时, 稳态下的能量消耗也不同。期望间距设为 5.95 m 时, 车辆队列稳态能量消耗降低, 与图 9 得到的结果一致, 说明了本文提出的稳态下能量消耗评价函数的有效性。

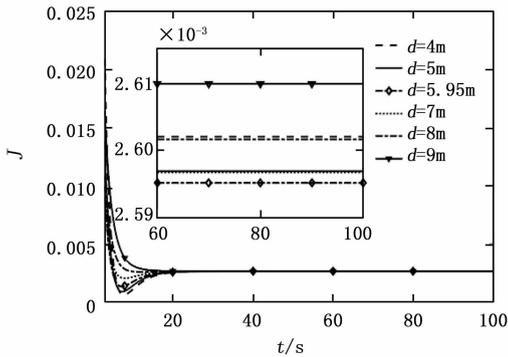


图 10 不同期望间距下能量消耗曲线

## 5 结束语

本文研究了空气流动阻力异构的非线性车辆队列最优能耗控制问题。首先,构建队列行驶车辆的风阻系数随车辆间距变化函数,并建立了基于异构风阻系数的车辆动力学模型。其次,设计基于滑模控制的非线性车辆队列控制方法,利用 Lyapunov 理论证明了车辆的渐进稳定性,并采用耦合滑模面来保证队列稳定性。在此基础上,定义稳态条件,构建了稳态下车队能量消耗评价模型,并通过优化分析的方式,计算车辆队列能量消耗最优的期望车间距。最后,通过仿真验证了算法的可行性与有效性。

### 参考文献:

- [1] COLOMBO A, CAMPOS G, ROSSA F D. Control of a City Road Network: Distributed Exact Verification of Traffic Safety [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62 (10): 4933 - 4948.
- [2] 王亚飞. THMR-V 平台上的智能交通监控系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (7): 106 - 109.
- [3] 刘云翔, 黄越, 朱萍, 等. 基于模糊区间的智能交通中信息融合性能评估方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (6): 1824 - 1826, 1858.
- [4] SAMY G S, KUMARAN S T, UTHAYAKUMAR M, et al. Numerical Analysis of Drag and Lift Coefficient of a Sport Utility Vehicle (SUV) [C] // International Conference on Recent Advances in Fluid and Thermal Sciences, 2019: 1 - 8.
- [5] KAMAL M, MUKAI M, MURATA J, et al. Ecological Driver Assistance System Using Model-Based Anticipation of Vehicle-Road-Traffic Information [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2010, 4 (4): 244 - 251.
- [6] HOMCHAUDHURI B, VAHIDI A, PISU P. A Fuel

Economic Model Predictive Control Strategy for a Group of Connected Vehicles in Urban Roads [C] // American Control Conference, 2015: 2741 - 2746.

- [7] ZHAO R C, WONG P K, XIE Z C, et al. Real-Time Weighted Multi-Objective Model Predictive Controller for Adaptive Cruise Control Systems [J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18 (2): 279 - 292.
- [8] HOMCHAUDHURI B, VAHIDI A, PISU P. Fast Model Predictive Control-Based Fuel Efficient Control Strategy for a Group of Connected Vehicles in Urban Road Conditions [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25 (2): 760 - 767.
- [9] TSUEI L, Ö Savas. A Wind Tunnel Investigation of the Transient Aerodynamic Effects on a Four-Car Platoon during Passing Maneuvers [C] // SAE 2000 World Congress, 2000: 1 - 13.
- [10] ZABAT M, FRASCAROLI S, BROW F K. Drag Measurements on 2, 3 and 4 Car Platoons [C] // International Congress & Exposition, 1994: 127 - 138.
- [11] ZABAT M, STABILE N, FRASCAROLI S, et al. Drag Forces Experienced by 2, 3 and 4-Vehicle Platoons at Close Spacings [C] // International Congress & Exposition, 1995: 119 - 127.
- [12] RICHARD M W, STEVEN X S B. Simple and Low-Cost Aerodynamic Drag Reduction Devices for Tractor-Trailer Trucks [J]. International Truck & Bus Meeting & Exhibition, 2003: 1 - 18.
- [13] 傅立敏, 贺宝琴, 吴允柱, 等. 队列行驶车辆间距对气动特性的影响 [J]. 汽车工程, 2007, 29 (5): 365 - 368.
- [14] 傅立敏, 吴允柱, 贺宝琴. 队列行驶车辆的空气动力特性 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2006, 36 (6): 871 - 875.
- [15] 张立发, 赵秀春, 高天一. 基于滑模控制的车辆自适应巡航系统设计 [J]. 大连民族大学学报, 2021, 23 (1): 36 - 39 + 68.
- [16] WANG J, LUO X, WANG L, et al. Integral Sliding Mode Control Using a Disturbance Observer for Vehicle Platoons [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67 (8): 6639 - 6648.
- [17] GUO X, WANG J, FA Ng L, et al. Distributed Adaptive Integrated-Sliding-Mode Controller Synthesis for String Stability of Vehicle Platoons [J]. IEEE

Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17 (9): 2419 - 2429.

[18] RODONYI G, SZABO Z. Adaptation of Spacing Policy of Autonomous Vehicles Based on an Unknown Input and State Observer for a Virtual Predecessor Vehicle [C] // 55th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2016: 1715 - 1720.

[19] GUO X G, WANG J L, FANG L, et al. CNN-Based Distributed Adaptive Control for Vehicle-Following Platoon With Input Saturation [J]. IEEE Transac-

tions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 19 (10): 1 - 12.

[20] GUO X, WANG J, LIAO F, et al. Distributed Adaptive Sliding Mode Control Strategy for Vehicle-Following Systems With Nonlinear Acceleration Uncertainties [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66 (5): 981 - 991.

[21] 贺宝琴, 吴允柱, 傅立敏. 汽车外形对智能车辆队行驶气动特性的影响 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38 (1): 7 - 11.

(上接第 71 页)

## 5 结束语

本文从油罐车运输安全角度出发, 设计研发了基于 SI1000 的油罐车状态监测系统, 实现了无线电子铅封以及罐壁温度、罐体倾角监测, 该系统的应用可以有效预防由于罐体温度过高或油罐倾斜、漏油而引发的交通事故。经过实验测试, 各个参数的测量误差值在 5% 以内, 且系统运行情况良好, 符合系统设计需求。测试过程中发现系统运行时间过长时存在数据库运行卡顿现象, 下一步还需开发数据缓存功能, 合理分配数据库空间, 以保障系统运行顺畅。

## 参考文献:

[1] PLANAS E, PASTOR E, PRESUTTO F, et al. Results of the MITRA project: monitoring and intervention for the transportation of dangerous goods [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152 (2): 516 - 526.

[2] 王文勇. 危化品运输监测系统中的探测器软件设计与实现 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.

[3] 邹建基. 基于 Zigbee 技术的危化品车辆监测无线传感网络设计 [D]. 广州: 广东工业大学, 2015.

[4] 苑宇坤. 基于 ZigBee 和百度地图的危化品运输跟踪监测系统研究 [D]. 太原: 中北大学, 2016.

[5] 赵宁, 赵志明. 油气储运漏油收集装置设计 [J]. 内蒙古石油化工, 2021, 47 (1): 61 - 62.

[6] 毛伟成. 危化品运输车辆在线监测管理系统研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.

[7] 李瑞. 油罐车防盗油监测设备防爆设计 [J]. 电气防爆, 2017 (4): 6 - 8.

[8] 赵国龙. 基于无线传感器网络的危化品物流车辆工况远程监测系统 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.

[9] 王磊. 危化品罐车运输安全智能监测预警系统的研究 [D]. 淮阴: 淮阴工学院, 2020.

[10] NING X, SUMITRANGWALA, KRISHNA KANT CHINTALAPUDI, et al. A wireless sensor network For structural monitoring [Z]. Embedded networked sensor systems, 2004.

[11] 宋文, 王兵, 周应宾. 无线传感器网络技术与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 31 - 52.

[12] 吴明辉. 基于 ARM 的嵌入式系统开发与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.

[13] 李善荣, 闫述. Si1000 低功耗性能与在无线传感器节点上的应用开发 [J]. 无线通信技术, 2011, 20 (3): 32 - 37.

[14] 黄智伟, 李富英. 基于射频收发芯片 nRF401 的计算机接口电路设计 [J]. 微电子学与计算机, 2002 (5): 40 - 41.

[15] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 4 - 14.

[16] JASON HILL, ROBERT SZEWCZYK, ALEC WOO, et al. System architecture directions for networked sensors [J]. ACM SIGARCH Computer Architecture News, 2000, 28 (5): 93 - 104.

[17] 张阳春. 车辆监控系统中服务器软件关键技术的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.

[18] 武丽英, 侯建勤. 基于 GPRS 和 GPS 技术的移动油罐监控系统 [J]. 自动化仪表, 2020, 41 (7): 61 - 64.

[19] 李瑞. 油罐车防盗油监测设备防爆设计 [J]. 电气防爆, 2017 (4): 6 - 8.

[20] 惠飞, 赵祥模, 杨飞. 油罐车在途状态监测系统及其任务调度策略 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2011, 31 (4): 87 - 93.

[21] 胡啸. 基于 GPRS 网络的油罐车运营监管系统设计 [D]. 厦门: 厦门大学, 2008.