

文章编号: 1001-0920(2009)07-0996-05

## 自主车队的非线性建模与控制

岳伟, 郭戈

(大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 针对自主式车队建模与控制这一重要课题, 建立了包含路面坡度和风力因素的非线性车辆动力学模型, 进而基于反馈线性化方法提出一种对坡度和风速变化具有一定适应能力的非线性 PID 控制算法, 并给出了一种可以克服燃油和传输延时的控制器设计方法以及可允许的延时的上限. 所得的非线性模型在很大程度上完善了现有的车辆动力学模型. 仿真实验表明, 该控制方法不但可实现车队的稳定运行控制, 而且使车队控制效果大大改善.

**关键词:** 非线性模型; 反馈线性化; 非线性 PID; 执行器延时

中图分类号: U492.2

文献标识码: A

### Nonlinear modelling and control of autonomous platoon

YUE Wei, GUO Ge

(School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China. Correspondent: GUO Ge, E-mail: geguo@yeah.net)

**Abstract:** The important issue of modelling and control of autonomous platoons on highways with certain slope is investigated considering the wind effect and actuator delay. Firstly, a nonlinear mathematic model is established for the platoon's longitudinal movement, which is shown to be a great improvement of the existing dynamic models in that the road slope and wind force are considered. Then, by using feedback linearization strategy, a nonlinear PID control algorithm is presented which has certain adaptation to the effect of road slope and force effect on the platoon. Moreover, to overcome the effect of transmission and oil combustion delay, a controller design method and the upper bound of the allowable delay are derived. Under this controller, the platoon is made to be more stable. Simulations results show the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** Nonlinear model; Feedback linearization; Nonlinear PID; Actuator delay

## 1 引言

交通拥挤是全球化问题. 通过减小车间距离, 增加交通流量是解决交通拥挤问题的首选方法. 目前解决的方法大都靠车队的自主控制来实现. 要实现车队自主控制, 需要车队中车辆装有相应的传感器、执行器, 并且具有一定的通讯能力<sup>[1,2]</sup>.

自主车队纵向控制的研究已取得大量成果, 如文献[3-5]分别针对线性模型、非线性模型及滑模设计出 PID 类型的纵向车队控制器, 实现了车队在水平道路上不考虑外界环境影响下的稳定行驶. 文献[6]设计无迹卡尔曼滤波, 准确估计出对车队控制重要而又难以测量的状态变量, 较好地满足了车队控制的需要. 但是这些控制策略, 都没有考虑车队运行中受到风速及路面坡度等影响. 同时, 由于燃油延时

和传输延时的存在, 不得不考虑执行器延时(燃油延时和传输延时的总和)对车队的影 响. [7]通过实验结果显示了执行器的延时会降低车队的控制性能, 但没有给出理论分析. [8]虽然对车辆存在执行器延时的问 题进行了研究, 但并不适用于车队的控制.

本文将在文献[4]研究的基础上考虑坡度和风速对车队的影 响, 建立车辆非线性动态模型, 并设计控制器. 为了能使控制策略在实际中得到更好的应用, 本文在所提出的线性控制算法基础上, 进一步考虑执行器延时的问 题, 设计控制器.

## 2 车辆动态建模及车队结构

本文用于研究的车队是由 6 辆自左向右运动的车辆组成, 数学结构如下:

$$\dot{x}_i = x_{i-1} - x_i - d, \quad (1)$$

收稿日期: 2008-06-17; 修回日期: 2008-10-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60504017); 霍英东教育基金项目(111066); 新世纪优秀人才支持计划项目(NECT-04-0982).

作者简介: 岳伟(1981—), 男, 山东威海人, 博士生, 从事自主车队控制研究; 郭戈(1972—), 男, 甘肃庄浪人, 教授, 博士生导师, 从事控制系统分析与综合、工业过程控制等研究.

其中  $x_i (i = 0, 1, \dots)$  是车辆的参考位置,  $d$  是期望的车间距离,  $e_i$  是期望车间距离与实际距离误差, 结构如图 1 所示.

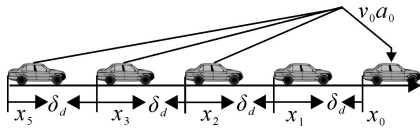


图 1 车队结构

车队控制过程中需要测量的信息有领队车的速度  $v_0$ , 跟随车辆速度  $v_i$ ; 领队车加速度  $a_0$ , 跟随车辆加速度  $a_i$ ; 车间水平距离误差  $e_i$ . 其中  $v_i, a_i$  和  $e_i$  的测量可通过第  $i$  辆车的传感器获得; 而  $v_0$  和  $a_0$  的测量需要无线通讯完成. 目前的通讯和信号处理技术可以保证所需数据的测量<sup>[1]</sup>, 假设车队中所有车辆都装有满足测量需要的通讯装置.

本文考虑风速及路面等因素后得到车队中第  $i$  辆车的动力学模型如下:

$$m_i \ddot{x}_i = F_i - m_i g \sin \theta - (A_i c_{d\bar{a}}/2) (\dot{x}_i + v_{wind})^2 - d_{mi}. \quad (2)$$

式中:  $F_i$  是车辆驱动力,  $\theta$  是路面坡度,  $\rho$  是空气质量密度,  $A_i$  是第  $i$  辆车的横截面面积,  $c_{d\bar{a}}$  是拽力系数,  $d_{mi}$  是第  $i$  辆车的机械阻力,  $x_i$  是车辆的水平位置,  $m_i$  是车的质量,  $g$  是重力加速度,  $v_{wind}$  是风的速度.

对式(2)两边同时求导, 得

$$m_i \dddot{x}_i = \dot{F}_i - 2k_{d\bar{a}} \ddot{x}_i \dot{x}_i - 2k_{d\bar{a}} \dot{x}_i v_{wind}, \quad (3)$$

其中  $k_{d\bar{a}} = A_i c_{d\bar{a}}/2$ .

结合如下发动机模型<sup>[9]</sup>:

$$\dot{F}_i = -\frac{F_i}{\tau_i} + \frac{u_i}{\tau_i}, \quad (4)$$

其中:  $\tau_i$  是发动机的时间常数,  $u_i$  是第  $i$  辆车节气阀输入量. 可得如下 3 阶非线性模型:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i = & \left\{ -\frac{2k_{d\bar{a}} \ddot{x}_i}{m_i} (\dot{x}_i + v_{wind}) - \frac{1}{\tau_i} \left[ \dot{x}_i + \frac{k_{d\bar{a}}}{m_i} (\dot{x}_i^2 + v_{wind}^2 + 2\dot{x}_i v_{wind}) + \frac{d_{mi}}{m_i} + g \sin \theta \right] \right\} + \frac{1}{m_i \tau_i} u_i. \end{aligned} \quad (5)$$

该模型是下文控制器设计的基础.

### 3 设计控制器

对于式(5)所示的车辆非线性模型, 本节采用反馈线性化的方法<sup>[4]</sup>设计如下控制器:

$$u_i = \frac{1}{a_i(\dot{x}_i)} [c_i - b(\dot{x}_i, \ddot{x}_i)]. \quad (6)$$

其中

$$a_i(\dot{x}_i) = \frac{1}{m_i \tau_i (\dot{x}_i)},$$

$$b_i(\dot{x}_i, \ddot{x}_i) =$$

$$\left\{ -\frac{2k_{d\bar{a}} \ddot{x}_i}{m_i} (\dot{x}_i + v_{wind}) - \frac{1}{\tau_i} \left[ \dot{x}_i + \frac{k_{d\bar{a}}}{m_i} (\dot{x}_i^2 + v_{wind}^2 + 2\dot{x}_i v_{wind}) + \frac{d_{mi}}{m_i} + g \sin \theta \right] \right\}.$$

由式(4) ~ (6) 可得

$$\ddot{x}_i = c_i. \quad (7)$$

这里  $c_i$  是待设计的附加输入量, 可根据车间距离误差、误差变化率、速度变化、加速度变化等信息进行设计.

1) 对第 1 辆车

$$c_1 = c_{p1-1}(t) + c_{v1-1}(t) + c_{a1-1}(t) + c_{v1-0}(t) + c_{a1-0}(t). \quad (8)$$

其中:  $v_0 = v_0 - \hat{v}_0$ ,  $a_0 = a_0 - \hat{a}_0$  是车辆的速度稳态值;  $c_{p1}, c_{v1}, c_{a1}, c_{v1}, c_{a1}$  为待设定参数. 取  $i = 1$  对式(1)两端求 3 阶导数得

$$\ddot{x}_1 = \ddot{x}_0 - \ddot{x}_1. \quad (9)$$

结合式(7)和(8)可得

$$\ddot{x}_1 = \ddot{x}_0 - [c_{p1-1}(t) + c_{v1-1}(t) + c_{a1-1}(t) + c_{v1}(v_0(t) - \hat{v}_0(t)) + c_{a1} a_0(t)],$$

对上式进行拉氏变换, 有

$$\begin{aligned} [s^3 + c_{a1}s^2 + c_{v1}s + c_{p1}] 1 &= [s^2 - c_{a1}s - c_{v1}] 0, \\ h_{1-0}(s) &= \frac{s^2 - c_{a1}s - c_{v1}}{s^3 + c_{a1}s^2 + c_{v1}s + c_{p1}}. \end{aligned}$$

2) 对第  $i$  辆车

$$c_i = c_{p-i}(t) + c_{v-i}(t) + c_{a-i}(t) + c_{v1}[v_0 - v_i] + c_{a1}[a_0 - a_i]. \quad (10)$$

同样, 由式(1)求导可得

$$\ddot{x}_i = \ddot{x}_{i-1} - \ddot{x}_i.$$

结合式(7)和(10)可得

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i = & c_{p-i-1} + c_{v-i-1} + c_{a-i-1} + c_{v1}[v_0(t) - v_{i-1}(t)] + c_{a1}[a_0(t) - a_{i-1}(t)] - c_{p-i} - c_{v-i} - c_{a-i} - c_{v1}[v_0(t) - v_i(t)] - c_{a1}[a_0(t) - a_i(t)]. \end{aligned}$$

对上式进行拉氏变换, 可得

$$\begin{aligned} [s^3 + (c_a + c_{a1})s^2 + (c_v + c_{v1})s + c_p] i &= [c_a s^2 + c_v s + c] i-1, \\ h_{i-i-1} &= \frac{c_a s^2 + c_v s + c}{s^3 + (c_a + c_{a1})s^2 + (c_v + c_{v1})s + c_p}, \end{aligned}$$

其中  $c_p, c_v, c_a, c_{v1}, c_{a1}$  为待设定系数.

需注意, 设计待设定参数时要满足以下条件:

- 1) 车队中每辆车能稳定运行, 要求传递函数所有极点位于  $s$  左半平面;
- 2) 避免因领队车辆信息误差的增大(即所谓的 Slinky-effect), 而使车间距离呈递增状态变化, 这就要求对于  $w > 0$ , 有  $|h_i(jw)/h_{i-1}(jw)| < 1$ ;

3) 避免车队抖动,对任意时刻  $t > 0$  时,要满足  $g(t) > 0$ .

采用线性控制器可保证车队的稳定,但在车队运行过程中,由于领队车辆加速度的变化以及坡度和风速等外界因素的影响,使得事先设定的参数对车队的控制不够理想,变化较大时甚至引起车队的不稳定,尤其是在减速阶段,极易使车辆发生碰撞.这里采用变参数结构(VAPID 结构如图 2 所示)来改进经典 PID 的不足.即将参数  $c_p, c_v, c_a, c_{vl}, c_{al}$  取为偏差的函数,根据偏差的大小,实时改变参数,以提高控制性能,使车间距离误差变化更小.根据文献[10]的分析,可将参数与偏差的函数关系取为

$$\begin{aligned} k_p &= k_{p0}(1 + k_p(1 - \exp(-e^2))), \\ k_i &= k_{i0}(k_i + k_i \exp(-e^2)), \\ k_d &= k_{d0}(1 + k_d(e^2)). \end{aligned} \quad (11)$$

其中:  $k_p$  代表  $c_p, c_{vl}, c_{al}$  的取法;  $k_d$  代表  $c_v, c_a$  的取法;  $1, 2, 3$  为待设定系数,其取值可根据文献[10]选取;  $k_{p0}, k_{i0}, k_{d0}$  是按常规 PID 得到的参数(即按常规 PID 得到的  $c_p, c_v, c_a, c_{vl}, c_{al}$ );  $k_p, k_i, k_i, k_d$  为修正系数.  $k_p$  主要取决于控制变量的限制幅值和对象的稳定性,  $k_i$  反映大偏差时的积分作用,  $k_i$  反映稳态值附近的积分作用,  $k_d$  反映稳态值附近的微分作用.之所以取成上述关系是因为比例系数  $k_p$  在偏差值较小时取较小值,这样有利于加快响应速度,同时具有很好的稳定性,积分系数  $k_i$  在偏差较小时取较大值,在偏差较大时取较小值,这样既有利于保证稳态无静差,又不会引起饱和而使超调增大、调节时间延长;微分系数  $k_d$  在偏差较小时取较大值,在偏差较大时取较小值,这样能加快控制器对小偏差的反应速度,以便出现干扰时能够及时调整控制动作.

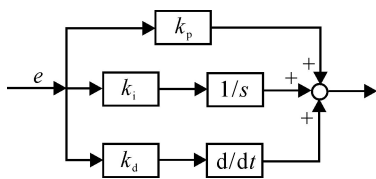


图2 VAPID 结构图

将式(11)代入(10)可得第  $i$  辆车的非线性控制律如下:

$$\begin{aligned} c_i &= c_{p0}(1 + c_p(1 - \exp(-e^2))) \dot{e}_i(t) + c_{d0}(1 + \\ &c_d(e^2)) \ddot{e}_i(t) + c_a \ddot{e}_i(t) + k_{i0}(1 + \\ &\dot{c}_v(1 - \exp(-e^2)) [v_0 - v_i]^2) [v_0 - v_i] + \\ &k_{d0}(1 + \dot{c}_a(1 - \exp(-e^2)) [a_0 - a_i]^2) [a_0 - a_i]. \end{aligned} \quad (12)$$

#### 4 构建保证车辆稳定控制器延时上限

假设燃油及传输导致的延时为  $h$ ,则实际执行

的控制信号  $u_i$  为

$$u_i(t-h) = \frac{1}{a_i(\dot{x}_i)} [c_i(t-h) - b(\dot{x}_i, \ddot{x}_i)]. \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} c_i(t-h) &= \\ &c_{p1}(t-h) + c_{i1}(t-h) + c_{a1}(t-h) + \\ &c_{vl}[v_0(t-h) - v_0(t-h)] + c_{al}a_0(t-h), \quad (14) \\ c_i(t-h) &= \\ &c_{p2}(t-h) + c_{v2}(t-h) + \\ &c_{a2}(t-h) + c_{vl}[v_0(t-h) - v_i(t-h)] + \\ &c_{al}[a_0(t-h) - a_i(t-h)]. \end{aligned} \quad (15)$$

这里待定参数  $c_p, c_v, c_a, c_{vl}, c_{al}$  同上节.

由式(7)得  $\dot{a}_i = c_i$ ,假设车队中存在的延时相同,结合式(15)可得

$$\begin{aligned} \dot{a}_i(t) &= \hat{c}_{p2}(t-h) + \hat{c}_{v2}(t-h) + \\ &\hat{c}_{a2}(t-h) + \hat{c}_{vl}(v_0(t-h) - \\ &v_i(t-h)) + \hat{c}_{al}(a_0(t-h) - a_i(t-h)). \end{aligned} \quad (16)$$

其中  $\hat{c}_p = c_p/m, \hat{c}_v = c_v/m, \hat{c}_a = c_a/m, \hat{c}_{vl} = c_{vl}/m, \hat{c}_{al} = c_{al}/m$ .

由式(1)可得

$$\ddot{e}_i(t) = \dot{a}_{i-1}(t) - \dot{a}_i(t), \quad (17)$$

对于  $i = 1$ ,将式(14)和(16)代入(17)得到第1辆车的距离误差方程为

$$\begin{aligned} \ddot{e}_1(t) &= \\ &\dot{a}_0(t) - \hat{c}_{p1}(t-h) - (\hat{c}_v + \hat{c}_{vl}) \dot{e}_1(t-h) - \\ &(\hat{c}_a + \hat{c}_{al}) \ddot{e}_1(t-h). \end{aligned} \quad (18)$$

同样,将式(16)代入(17)可得到第  $i$  辆车的距离误差满足如下关系:

$$\begin{aligned} \ddot{e}_i(t) &= -\hat{c}_{p2}(t-h) - (\hat{c}_v + \hat{c}_{vl}) \dot{e}_i(t-h) - \\ &(\hat{c}_a + \hat{c}_{al}) \ddot{e}_i(t-h) + \hat{c}_{p1}(t-h) + \\ &\hat{c}_v \dot{e}_{i-1}(t-h) + \hat{c}_a \ddot{e}_{i-1}(t-h). \end{aligned} \quad (19)$$

车队要想取得好的控制性能,需保证每辆车稳定,考虑式(19)可得到每辆车的闭环系统如下:

$$\ddot{e}_i(t) = -\hat{c}_{p2}(t-h) - (\hat{c}_v + \hat{c}_{vl}) \dot{e}_i(t-h) - (\hat{c}_a + \hat{c}_{al}) \ddot{e}_i(t-h). \quad (20)$$

考虑如下的组合方程:

$$\begin{bmatrix} \ddot{e}_1(t) \\ \ddot{e}_2(t) \\ \vdots \\ \ddot{e}_i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{e}_1(t) \\ \dot{e}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{e}_i(t) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\hat{c}_p & -\hat{c}_v & -\hat{c}_{vt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t-h) \\ \dot{i}(t-h) \\ \ddot{i}(t-h) \end{bmatrix},$$

设

$$e(t) = \begin{bmatrix} i(t) \\ \dot{i}(t) \\ \ddot{i}(t) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\hat{c}_p & -\hat{c}_v & -\hat{c}_{vt} \end{bmatrix},$$

可以得到

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + Be(t-h). \tag{21}$$

其中:  $0 < h < \infty, h$  是常数;  $e(t)$  对所有  $t \geq 0$  都连续可微. 于是根据牛顿莱布尼兹公式, 有

$$e(t-h) = e(t) - \int_{-h}^0 \dot{e}(t+\tau) d\tau = e(t) - \int_{-h}^0 [Ae(t+\tau) + Be(t-h+\tau)] d\tau.$$

方程(21) 可另写为

$$\dot{e}(t) = (A+B)e(t) - B \int_{-h}^0 [Ae(t+\tau) + Be(t-h+\tau)] d\tau. \tag{22}$$

以下引理是保证车辆渐近稳定的充分条件.

引理 1<sup>[11]</sup> 如果延时上界满足  $h < \tau_1$ , 则系统(22) 渐近稳定, 其中

$$\tau_1 = \frac{\min(Q)}{PB(A P^{-1} A^T + B P^{-1} B^T) B^T P + 2 P /}, > 0, P$$

为满足如下方程的正定对称矩阵:

$$(A+B)^T P + P(A+B) = -Q,$$

这里  $Q$  是任意正定对称矩阵.

引理 1 含有一个自由常数, 因此  $\tau_1$  可用如下结论进一步优化.

引理 2<sup>[11]</sup> 对于给定矩阵  $A, B, C, P$  和  $Q$ , 函数

$$f(\tau) = \frac{\min(Q)}{PB(A P^{-1} A^T + B P^{-1} B^T) B^T P + 2 P /},$$

取最大值时对应的  $\tau$  为

$$= [2 P / PB(AA^T + BB^T + CC^T) B^T P + 2 PC(AA^T + BB^T + CC^T) C^T P]^{1/2}.$$

假设车队中每辆车都采用控制律(13), 车队的动态方程(19) 经拉普拉斯变换, 可以写成如下传递函数:

$$G(s) = \frac{i(s)}{i-1(s)} = \frac{(\hat{c}_p + \hat{c}_v s + \hat{c}_a s^2) e^{-hs}}{[\hat{c}_p + (\hat{c}_v + \hat{c}_{vt}) s + (\hat{c}_a + \hat{c}_{at}) s^2] e^{-hs} + s^3}. \tag{23}$$

同样, 设计待定参数要满足上节所述 3 个条件.

注 1 车队要避免 Slinky-effects, 要求下式:

$$G(jw) = \left| \frac{i(jw)}{i-1(jw)} \right| = \frac{\{[(\hat{c}_p - \hat{c}_a w^2)^2 + \hat{c}_v^2 w^2] / \{(\hat{c}_{vt}^2 + 2\hat{c}_v \hat{c}_{vt} - 2\hat{c}_a \hat{c}_s) + 2\hat{c}_p \sin(hw) w^3 + [2\hat{c}_a \hat{c}_a + \hat{c}_{at}^2 + 2(\hat{c}_v - \hat{c}_{vt}) \cos(hw) w^4 - 2(\hat{c}_a + \hat{c}_{at}) w^5 \sin(hw) + w^6 + (\hat{c}_p - \hat{c}_a w^2)^2 + \hat{c}_v^2 w^2\} \}^{1/2}}$$

对任意的  $w > 0$ , 满足  $|i(jw)/i-1(jw)| < 1$ .

因为  $(\hat{c}_p - \hat{c}_a w^2)^2 + \hat{c}_v^2 w^2 > 0$ , 所以仅需满足

$$(\hat{c}_{vt}^2 + 2\hat{c}_v \hat{c}_{vt} - 2\hat{c}_a \hat{c}_s) + 2\hat{c}_p \sin(hw) w^3 + \{2\hat{c}_a \hat{c}_a + \hat{c}_{at}^2 + 2[\hat{c}_v - \hat{c}_{vt}]\} \cos(hw) w^4 - 2(\hat{c}_a + \hat{c}_{at}) w^5 \sin(hw) + w^6 > 0.$$

另外,  $\hat{c}_p, \hat{c}_a, \hat{c}_a > 0, w > 0, \sin(hw) < hw < 1, \cos(hw) > 1$ , 可知, 只要下述关系成立:

- 1)  $\hat{c}_v + \hat{c}_{vt} > 0$ ;
- 2)  $\hat{c}_{vt}^2 + 2\hat{c}_v \hat{c}_{vt} - 2\hat{c}_a \hat{c}_p > 0$ ;
- 3)  $2\hat{c}_p - \hat{c}_a^2 > 0$ .

则对任意的  $w > 0$ , 总有  $|i(jw)/i-1(jw)| < 1$ , 即可使车队避免 Slinky-effects 效应.

由引理 1 和上述条件 3) 得到延时上限要满足

$$h < \min\{\tau_1, \hat{c}_a / 2\hat{c}_p\}. \tag{24}$$

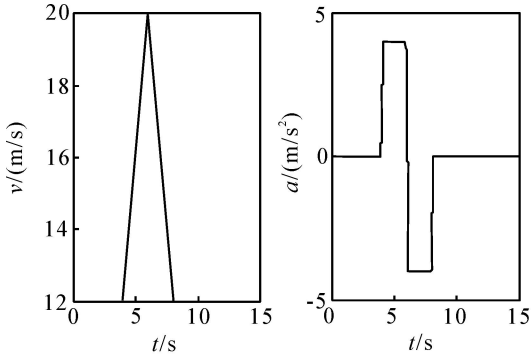
注 2 文献[12]中指出, 要避免车队抖动, 只要求车队对任意  $t > 0$  都满足  $g(t) > 0$ , 其中  $g(t)$  为  $G(s)$  的脉冲响应函数.

### 5 仿真实验

为了检验本文控制方法的有效性, 并与文献[4]中 PID 类型控制器作一比较, 本文对由 6 辆车组成的车队进行了仿真. 由式(24) 可以得到延时上限值为  $h < 0.065$  s; 仿真中延时取为 0.06 s, 可满足车队稳定性需要; 发动机时间常数  $\tau = 0.1$ . 其他控制参数及车队运行初始条件如下: 初始状态: 初始速度为 12 m/s, 预设车间安全距离 1 m, 路面坡度为  $(-30^\circ, 30^\circ)$ ; PID 控制器:  $c_p = 13.6, c_v = 2.6, c_a = 0.7, c_{vt} = -2.6, c_{at} = 2.3$ ; 非线性 PID 控制器:  $c_p = 13.6, c_v = 2.6, c_a = 0.7, c_{vt} = -2.6, c_{at} = 2.3, \tau_1 = -100, \tau_2 = -100, \tau_3 = -25$ .

领队车辆速度  $v_0$  和加速度  $a_0$  曲线如图 3 所示. 由图 4 ~ 图 6 可知, 单纯采用 PID 控制时车队间距离误差达到 1.4 m, 超过车队预设安全距离, 且跟随车辆的速度和加速度响应较慢. 而采用非线性 PID 控制器如图 7 和图 8 所示, 车间距离误差仅有 0.15 m, 大大改善了车队的安全性. 图 7 显示车队在 15 s 已经达到稳定, 比前者响应速度更快. 同时, 通过计算可知频率响应  $|G(jw)| < 1$ , 车队可避免 Slinky-effects; 而脉冲响应  $g(t) > 0$  难以满足, 所以

车队在调速过程中仍存在抖动,从乘车舒适性上考虑,该算法仍有改进余地.



(a) 领队车辆速度 (b) 领队车辆加速度

图3 领队车辆速度、加速度曲线

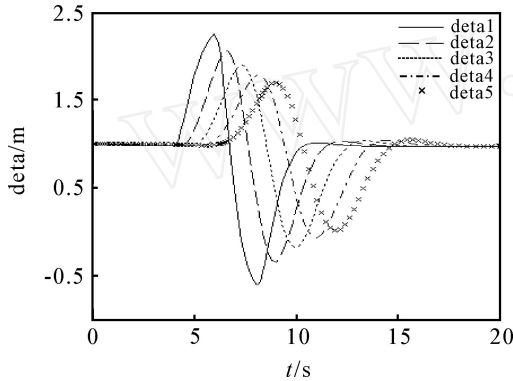


图4 PID控制器车车间距离误差曲线

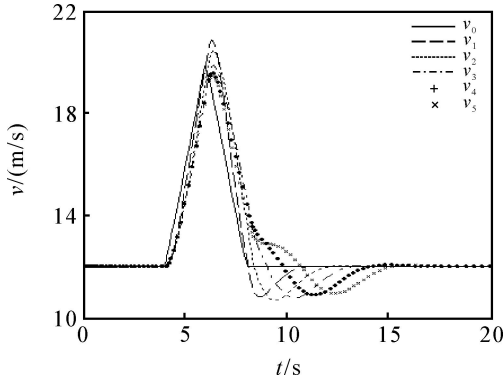


图5 PID控制器车辆速度曲线

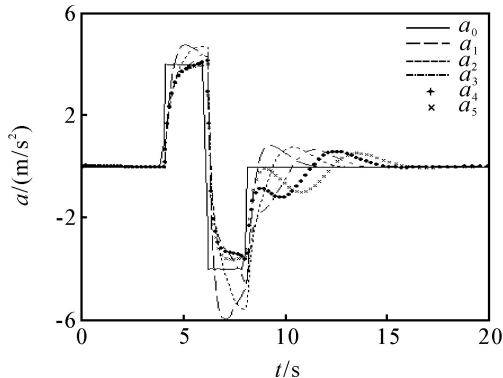


图6 PID控制器车辆加速度曲线

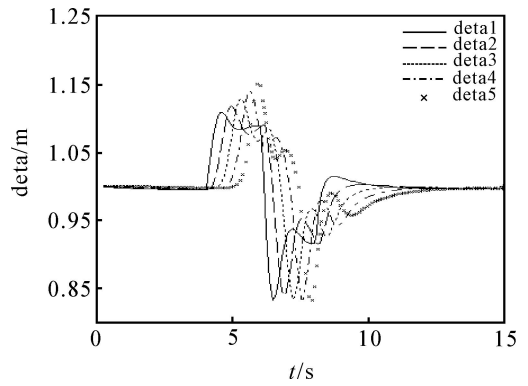


图7 非线性PID车车间距离误差曲线

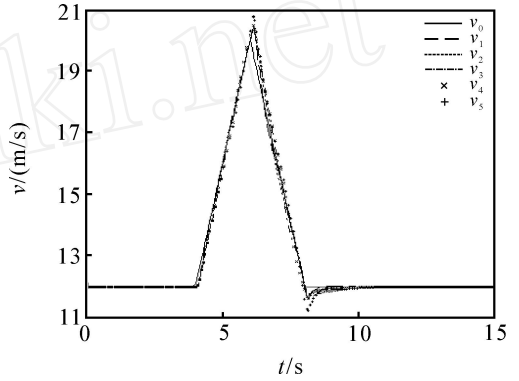


图8 非线性PID车队车辆速度曲线

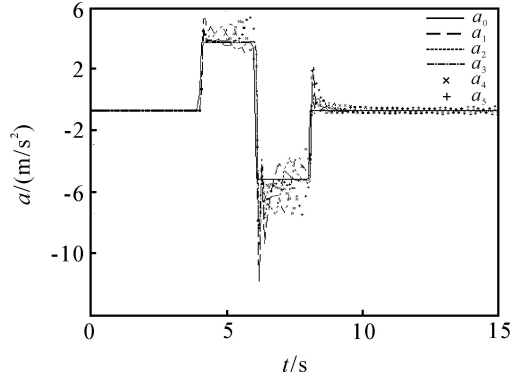


图9 非线性PID车队车辆加速度曲线

### 6 结论

本文考虑了车队行驶过程中的路面坡度和风速的影响,建立了新的非线性车辆动力学模型,并采用反馈线性化方法设计非线性PID控制器.所得控制器参数可根据变化的坡度实时改变其参数,较好地解决了传统PID参数固定的缺点,保证车队在坡度变化的路面上安全行驶.另外,针对燃油延时和传输延时问题,获得了可保证车队稳定运行的控制器设计方法和对应的延时的上限值.

本文主要讨论了车辆纵向控制问题,目前正着手解决车辆的横向-纵向综合控制问题,可望得到更加有效的实用控制方法.

(下转第1006页)

- Reliability Engineering and System Safety, 2005, 87 (2): 173-189.
- [5] 杨帆, 萧德云. 概率 SDG 模型及故障分析推理方法[J]. 控制与决策, 2006, 21(5): 487-491.  
(Yang F, Xiao D Y. Probabilistic SDG model and approach to inference for fault analysis[J]. Control and Decision, 2006, 21(5): 487-491.)
- [6] Oyeleye O O, Kramer M A. Qualitative simulation of chemical process systems: Steady-state analysis [J]. AIChE J, 1988, 34(9): 1441-1454.
- [7] 王强. 基于 SDG 的控制系统有效性方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2006.  
(Wang Q. Research on dynamic description and inference approaches in SDG model-based fault analysis [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006.)
- [8] Maurya M R, Rengaswamy R, Venkatasubramanian V. A systematic framework for the development and analysis of signed digraphs for chemical processes: Algorithms and analysis [J]. Industrial and Chemical Research, 2003, 42(20): 4789-4810.
- [9] Maurya M R, Rengaswamy R, Venkatasubramanian V. A systematic framework for the development and analysis of signed digraphs for chemical processes: Control loops and flowsheet analysis[J]. Industrial and Chemical Research, 2003, 42(20): 4821-4877.
- [10] Maurya M R, Rengaswamy R, Venkatasubramanian V. A signed directed graph-based systematic framework for steady-state malfunction diagnosis inside control loops [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(6): 1790-1810.
- [11] 杨帆. SDG 模型在故障分析中的动态描述与推理方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.  
(Yang F. Research on dynamic description and inference approaches in SDG model-based fault analysis [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.)
- [12] Yang F, Xiao D Y. Approach to fault diagnosis using SDG based on fault revealing time [C]. Proc of Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation. NY: IEEE, 2006: 5744-5747.
- [13] 金以慧. 过程控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.  
(Jin Y H. Process control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.)

(上接第 1000 页)

### 参考文献 (References)

- [1] Sadayuki Tsugawa. A cooperative driving system with automated vehicles and inter vehicle communications in demo 2000 [C]. IEEE Proc of Intelligent Transportation Systems. Oakland, 2001: 918-923.
- [2] Radoslav Natchev, Ralf Heidger. Trajectory computation for tracker evaluation and linkage processing [C]. IEEE Proc of ESAV. Capri, 2008: 248-253.
- [3] Swaroop D V A H G, Rajagopal K R. Intelligent cruise control systems and traffic flow stability [C]. Transportation Research. Berkeley, 1999: 329-352.
- [4] Tae Soo No, Kil To Chong, Do-Hwan Roh. A Lyapunov function approach to longitudinal control of vehicles in a platoon [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2001, 50(3): 116-124.
- [5] Lydie Nouveliere, Said Mammam. Experimental vehicle longitudinal control using a second order sliding mode technique [J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(3): 943-945.
- [6] Zhu T J, Zheng H Y. Application of unscented Kalman filter to vehicle state estimation [C]. Int Colloquium on Computing, Communication, Control and Management. Washington DC, 2008, 2: 135-139.
- [7] Liu X H, Karl Hedrick J. Effects of communication delay on string stability in vehicle platoons [C]. IEEE Intelligent Transportation Systems Conf Proc. Oakland, 2001: 625-630.
- [8] Chol S B, Hedrick J K. Robust throttle control of automotive engines: Theory and experiments [J]. ASME of DSMC, 1996, 118(4): 92-98.
- [9] Kun Li, Ioannou P. Modeling of traffic flow of automated vehicles [J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2004, 5(3): 99-113.
- [10] 江青茵. 无辨识自适应控制预估算法及应用 [J]. 自动化学报, 1997, 23(2): 160-166.  
(Jiang Q Y. Predictive algorithms of identification free algorithms for adaptive control and its application [J]. Acta Automatica Sinica, 1997, 23(2): 160-166.)
- [11] Stewart G W. Introduction to matrix computations [M]. New York: Academic Press, 1973.
- [12] Fu M Y, Jiu H, Ruan Y B Li. A new kind of robust design method of intelligent vehicle lateral control [C]. IEEE Proc of Intelligent Control and Automation. Hangzhou, 2004, 3: 2438-2442.