

文章编号: 1001-0920(2002)02-0211-04

# 车组偏差系统的分散控制

陈雪波, 李小华, 王成玖

(鞍山钢铁学院 电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山 114002)

**摘要:** 研究汽车车组速度和距离偏差系统的控制问题。针对具有重叠结构的车组速度与距离偏差的线性随机系统模型, 利用系统的包含原理, 给出一种分散、次优的 LQG 控制设计方法, 并给出了利用该方法对车组偏差系统进行控制的仿真结果。

**关键词:** 车组; 偏差; 重叠结构; 包含原理; 分散控制

**中图分类号:** TP 13      **文献标识码:** A

## Decentralized control of car-string bias systems

CHEN Xue-bo, LI Xiao-hua, WANG Cheng-jiu

(College of Electronic and Information Engineering, Anshan Institute of Iron and Steel Technology, Anshan 114002, China)

**Abstract:** The control problem of car-string velocity and distance bias system with overlapping structures is presented. For the linear stochastic system model with overlapping structures, a decentralized and suboptimal LQG control scheme is proposed by using inclusion principle. The simulation results are given by applying this design method to the car-string bias system.

**Key words:** car-string; bias; overlapping structure; inclusion principle; decentralized control

## 1 引言

高速公路安全及其自动化管理是社会发展的—项重要课题, 具有可观的经济效益和社会效益。汽车组队保持一定距离同速行驶<sup>[1,2]</sup>是在现有高速公路的基础上, 最大限度地提高交通容量, 减少交通事故的有效方法之一。车组速度与距离偏差系统<sup>[1]</sup>可描述成具有重叠结构的线性系统<sup>[3]</sup>, 即把两两相邻汽车的运动状态模型看成是系统的重叠互联子系统。考虑到实际中的随机干扰和测量噪声, 利用系统的包含原理<sup>[4,5]</sup>对系统的重叠互联子系统解耦, 可进行系统重叠结构分解意义下的分散 LQG 控制设计。这种分散控制设计体现了车组中汽车自主行驶并协

同车组运行的特性, 使得车辆具备较强的应付突发事件和协调的能力。仿真结果表明, 作为系统的次优控制, 分散控制接近对系统集中最优控制的水平。

## 2 系统的数学模型

假设有  $N$  辆汽车顺序排列组队同向行驶的车组偏差系统, 其运动方程可根据每辆汽车的速度和相邻两辆汽车距离的变化量来描述<sup>[1,3]</sup>。每辆汽车在行驶中所施加驱动力矩的变化量可表示为它的独立输入。由物理关系, 车组偏差系统有如下关系

$$\begin{cases} \Delta \dot{v}_i = -\Delta v_i + \Delta u_i, \\ \Delta d_{i,i+1} = \Delta v_i - \Delta v_{i+1}, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

收稿日期: 2000-11-20; 修回日期: 2001-02-21

基金项目: 辽宁省教委科研基金项目(991221567)

作者简介: 陈雪波(1960—), 男, 福建莆田人, 教授, 博士, 从事大系统、复杂系统和多变量系统的研究; 李小华(1964—), 女, 河南商丘人, 副教授, 硕士, 从事大系统的结构分析与控制研究。

对于速度、距离和输入变化量  $\Delta v_i, \Delta d_{i,i+1}, \Delta u_i$ , 可简写成  $v_i, d_{i,i+1}, u_i$ 。考虑到  $v_i$  和  $d_{i,i+1}$  可测, 则车组偏差系统的线性随机状态空间模型可描述为

$$S: \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + F\xi \\ y = Cx + \eta \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $x = (v_1, d_{1,2}, v_2, \dots, d_{N-1,N}, v_N)^T$ ,  $v_i$  是第  $i$  辆汽车的速度变化量,  $d_{i,i+1}$  为第  $i$  和第  $i+1$  辆汽车之间距离的变化量;  $u = (u_1, u_2, \dots, u_N)^T$ ,  $u_i \in \Omega_i$  表示第  $i$  辆汽车各种因素(包括驾驶员人为因素)产生的在容许范围  $\Omega_i$  内的纵向驱动力矩变化量;  $y$  是系统状态的测量或输出;  $\xi$  和  $\eta$  分别是与输入  $u$  和输出  $y$  同维的白噪声随机向量, 与初始状态  $x_0$  相互独立; 一般有  $B = F$ 。

考虑相邻两辆汽车为一子系统, 显然车组偏差系统是一个具有重叠互联结构的系统。每个重叠子系统是对两两相邻汽车行驶状况的描述。由式(2)可得  $N-1$  个子系统的系统方程为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{v}_i \\ \dot{d}_{i,i+1} \\ \dot{v}_{i+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ d_{i,i+1} \\ v_{i+1} \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} u_i \\ u_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_i \\ \xi_{i+1} \end{bmatrix} \right) \\ \begin{bmatrix} y_{v_i} \\ y_{d_i} \\ y_{v_{i+1}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ d_{i,i+1} \\ v_{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_i \\ \eta_i \\ \eta_{i+1} \end{bmatrix} \\ &i = 1, 2, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (3)$$

注意到, 系统的重叠变量为车速的变化量  $v_i$ 。实际上, 首车(第1辆汽车)可看作是一个独立的子系统。它包含于第1个子系统中, 又是其它  $N-1$  辆汽车顺序行驶的参照。以  $N=3$  为例, 车组偏差系统(2)中的  $A, B, F$  和  $C$  阵分别为

$$A = \begin{array}{c|cc|cc} \hline -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \hline \end{array} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C = I_5$$

式中虚线表示子系统之间的重叠部分。可见系统(4)

是由式(3)中顺序排列的两个子系统重叠构成的。

### 3 分散控制算法

为得到分散的子系统, 利用包含原理<sup>[4,5]</sup> 扩展车组偏差系统的状态空间模型(2), 使得系统的重叠部分分解, 得到  $S$  的扩展空间

$$\tilde{S}: \begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \tilde{A}\tilde{x} + \tilde{B}(\tilde{u} + \tilde{\xi}) \\ \tilde{y} = \tilde{C}\tilde{x} + \tilde{\eta} \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} \tilde{A} = VAU + M_A \\ \tilde{B} = VBQ + M_B \\ \tilde{C} = TCU + M_C \end{cases} \quad (6)$$

当  $N=3$ , 即对系数阵(4)扩展时, 式(6)中的扩展阵分别为

$$\begin{aligned} U = S &= \begin{bmatrix} I_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 1-\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_2 \end{bmatrix} \\ V = T &= \begin{bmatrix} I_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1_{1 \times 2} & 0 \\ 0 & 0 & I_2 \end{bmatrix} \\ Q &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 1-\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1_{1 \times 2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

显然,  $UV = I_5, QR = I_3, ST = I_5$  补偿阵分别为

$$\begin{aligned} M_A &= \begin{bmatrix} 0_{1 \times 2} & 0_{1 \times 2} & 0_{1 \times 2} \\ 0_{4 \times 2} & M_2 & 0_{4 \times 2} \\ 0_{1 \times 2} & 0_{1 \times 2} & 0_{1 \times 2} \end{bmatrix} \\ M_B &= \begin{bmatrix} 0 & 0_{1 \times 2} & 0 \\ 0_{2 \times 1} & M_1 & 0_{2 \times 1} \\ 0 & 0_{1 \times 2} & 0 \end{bmatrix} \\ M_C &= \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & M_1 & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} M_1 &= \begin{bmatrix} \beta & 1-\beta \\ 1-\beta & \beta \end{bmatrix} \\ M_2 &= \begin{bmatrix} \beta & \beta & 1-\beta & 1-\beta \\ 1-\beta & 1-\beta & \beta & \beta \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

$\beta$  是重叠结构分解的动态平衡因子, 一般有  $0 < \beta < 1$ 。当  $N > 3$  时, 系统的扩展阵和补偿阵可按式

(7) 和(8) 类推. 对分散后车组偏差系统的各个子系统采用标准的LQG 控制方式, 根据包含原理的集结条件, 将系统扩展空间的控制律收缩回原系统并实现其分散控制.

系统的重叠结构分解和分散次优LQG 控制算法如下:

1) 根据车组车数  $N$ , 按式(7) 和(8) 类推, 取扩展阵  $V, T, U, Q$  和补偿阵  $M_A, M_B, M_F, M_C$ , 一般取动态平衡因子  $\beta = 0.5$ , 由系统  $S$  得到  $\tilde{S}$ ;

2) 由式(5) 和(6), 得到重叠结构分解的  $N - 1$  个子系统, 如式(3) 所示;

3) 设系统  $\tilde{S}$  的分散观测和控制增益阵分别为  $\tilde{L}_D$  和  $\tilde{K}_D$ , 则有分散的观测和控制

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \tilde{A}_D \tilde{x} + \tilde{B}_D \tilde{u} + \tilde{L}_D (\tilde{y} - \tilde{C}_D \tilde{x}) \\ \tilde{u} = - \tilde{K}_D \tilde{x} \end{cases} \quad (9)$$

为研究方便, 用  $\tilde{\Theta}_i$  分别表示  $\tilde{A}_D, \tilde{B}_D, \tilde{C}_D, \tilde{L}_D$  和  $\tilde{K}_D$ , 则  $\tilde{\Theta}_D = \text{diag}(\tilde{\Theta}_{11}, \tilde{\Theta}_{22}, \dots, \tilde{\Theta}_{(N-1)(N-1)})$ , 其中  $\tilde{\Theta}_{ii}$  分别为  $\tilde{A}_{ii}, \tilde{B}_{ii}, \tilde{C}_{ii}, \tilde{L}_{ii}$  和  $\tilde{K}_{ii}, i = 1, 2, \dots, N - 1$ , 表示子系统的系数阵、观测增益阵和控制增益阵;

4) 根据包含原理的约束和聚集条件<sup>[4,5]</sup>, 收缩观测器和控制器的增益阵, 即

$$\begin{cases} L_S = U (\tilde{L}_D + \Delta \tilde{L}_D) V \\ K_S = Q (\tilde{K}_D + \Delta \tilde{K}_D) V \end{cases} \quad (10)$$

其中  $\Delta \tilde{L}_D$  和  $\Delta \tilde{K}_D$  是适合于收缩条件的补偿阵;

5) 计算分散控制的次优度  $\mu = J_0/J_S$ , 其中  $J_0$  和  $J_S$  分别是系统集中最优控制和分散次优控制的性能指标.

### 4 系统的仿真结果

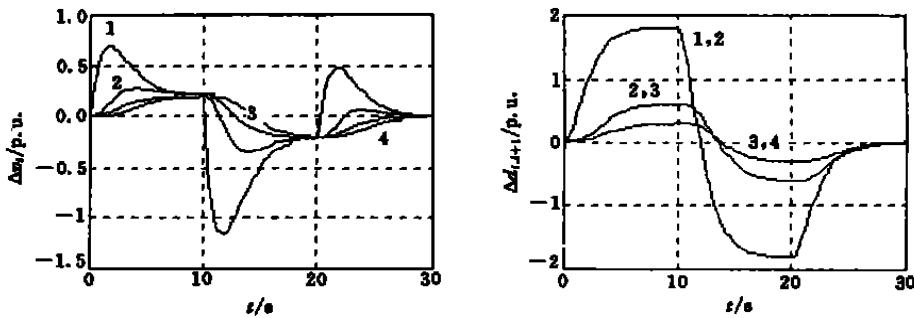
设系统  $S$  中  $N = 4$ , 即有 3 个子系统; 零均值的输入噪声  $\xi$  和量测噪声  $\eta$  的方差分别为  $R_\xi = 0.1 \times I_4, R_\eta = 0.1 \times I_7$ ; 最优性能指标加权阵  $W_x = \text{diag}(1, 40, 1, 40, 1, 40, 1), W_u = 16 \times I_6$ . 当首车驱动力矩变化量发生

$$du_1 = \begin{cases} 1, & 0 < t < 10, \\ -1, & 10 < t < 20, \\ 0, & 20 < t, \end{cases} \quad \Omega_1 \quad (11)$$

扰动时, 根据标准LQG 算法可解得最优观测和控制增益阵  $L_0$  和  $K_0$ . 由分散LQG 控制设计算法, 得车组偏差系统的次优观测和控制增益阵  $L_S$  和  $K_S$  分别为

$$L_S = \begin{bmatrix} 0.2014 & 0.0891 & 0.0057 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1782 & 0.8058 & -0.1782 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0057 & -0.0891 & 0.4029 & 0.0891 & 0.0057 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1782 & 0.8058 & -0.1782 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0057 & -0.0891 & 0.4029 & 0.0891 & 0.0057 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1782 & 0.8058 & -0.1782 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0057 & -0.1782 & 0.4029 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K_S = \begin{bmatrix} 0.5485 & 1.1180 & -0.5331 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.0663 & -2.2361 & 3.0971 & 2.2361 & -1.0663 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.0663 & -2.2361 & 3.2924 & 2.8284 & -1.4569 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.3642 & -0.7071 & 0.3950 & 0 \end{bmatrix}$$



(a) 车速偏差响应曲线 (b) 汽车间距偏差响应曲线

图 1 系统分散次优控制的仿真曲线

对应的次优度  $\mu = 0.8891$ 。对于车组偏差系统  $S$ , 当  $N = 4$  时, 次优分散 LQG 控制的仿真曲线如图 1 所示。

图 1(a) 和图 1(b) 分别表示次优控制时, 每辆汽车速度和汽车间距的变化量随首车驱动力矩短时变化的响应曲线。由于第 1 辆汽车驱动力矩短时变化是加减速变化, 因此第 1 辆汽车  $v_1$  和第 1, 2 辆汽车间距  $d_{1,2}$  响应曲线的波动较大, 随后的车速和汽车间距的响应曲线波动递减。这说明次优分散 LQG 控制的车组偏差系统是稳定的, 因为扩展系统的稳定性包含了原系统的稳定性<sup>[4]</sup>。如果考虑状态加权阵  $W_x = 40 \times I_7$ , 即速度和距离偏差同等重要时, 次优度可提高到  $\mu = 0.9164$ ; 当  $\beta = 0.5$  时, 次优度均有所降低。

## 5 结 论

具有重叠结构分解的分散 LQG 控制算法, 可实现对车组偏差系统的分散次优控制。本文的研究和仿真结果表明, 车组偏差系统的重叠结构可通过包含原理的约束和聚集条件来扩展和收缩, 得到解

耦的子系统 and 重叠结构分解意义下的分散观测和控制。完全的分散 LQG 控制取决于系统中汽车的性能和结构, 例如汽车自动驾驶、汽车之间通讯和先进的传感装置等。另外, 对车组偏差系统的进一步研究, 还应考虑加速度的变化对系统的影响。

### 参考文献(References):

- [1] Levine W S, Athans M. On the optimal error regulation of a string of moving vehicles[J]. IEEE Trans on AC, 1966, 11(3): 355-361.
- [2] Varaiya P. Smart cars on smart roads: Problems of control[J]. IEEE Trans on AC, 1993, 38(2): 195-207.
- [3] Ikeda M, Siljak D D. Overlapping decentralized control with input, state and output inclusion[J]. Control Theory and Advanced Technology, 1986, 2(2): 155-172.
- [4] Siljak D D. Decentralized control of complex systems[M]. New York: Academic Press, 1991.
- [5] Chen X B, Stankovic S S. Overlapping decomposition and decentralized LQG control for interconnected power systems[A]. Tsinghua University Proc of IEEE SMC[C]. Beijing: Int Academic Press, 1996. 1904-1909.

(上接第 202 页)

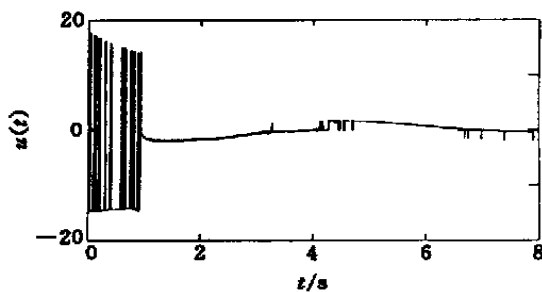


图 2 控制信号

## 6 结 论

本文提出一种间接自适应模糊控制器的设计方案, 根据李亚普诺夫方法, 确定了 I 型模糊系统中可调参数和逼近误差的自适应律。通过理论分析和系统仿真, 证明了闭环模糊控制系统的全局渐近稳定性。

### 参考文献(References):

- [1] Wang L X. Adaptive fuzzy systems and control—design and stability analysis[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- [2] 张乃尧, 金晖. 对稳定的模糊自适应控制方案的研究与改进[J]. 自动化学报(Acta Automatica Sinica), 1997, 23(2): 160-166.
- [3] 佟绍成, 周军. 非线性模糊间接和直接自适应控制器的设计和稳定性分析[J]. 控制与决策(Control and Decision), 2000, 15(3): 293-296.
- [4] 张天平, 冯纯伯. 一类非线性系统的自适应模糊滑模控制[J]. 自动化学报(Acta Automatica Sinica), 1997, 23(3): 361-369.
- [5] 张天平. 自适应模糊滑模控制器的设计与分析[J]. 自动化学报(Acta Automatica Sinica), 1999, 25(3): 370-374.
- [6] Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1993, 1(2): 146-155.