第28卷第7期
2011年7月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 28 No. 7
Jul. 2011

文章编号: 1000−8152(2011)07−1041−08

通讯网络影响下自主车队的控制

岳 伟[1], 郭 戈[2]

(大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 对通信网络影响下自主式车队的控制, 建立了车队通讯网络诱导因素影响下的混合车队控制模型, 这模型充分考虑了车队与通讯网络诱导因素(如: 量化、延时与丢包), 在很大程度上完善了现有的车队控制系统模型. 在该模型基础上设计可以解决车队通讯网络影响的保性能控制算法, 并进一步设计克服领队车辆干扰的控制器. 仿真试验表明, 本文获得的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: 混合模型; 量化; 延时与丢包; 保性能控制; H∞控制

中图分类号: U492.2+2　　**文献标识码**: A

Control of autonomous platoon under networked communication effect

YUE Wei[1], GUO Ge[2]

(School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: For the autonomous platoon control via wireless communication network, we develop a novel hybrid model by fully considering the induced constraints from the communication networks, such as time-delay, quantization and packet-dropout. This scheme greatly improves the existing models for autonomous platoon control. On the basis of this model, we can design a guaranteed-cost control for the autonomous platoon under the induced constraints from communication networks. An H-infinity controller is further designed to reduce the effect from the leading vehicle. Simulation results show that the proposed method provides the platoon a smooth operation, while greatly improves the efficiency of platoon control.

Key words: hybrid model; quantization; delay/dropout; guaranteed cost control; H-infinity control

1 引言(Introduction)

在过去的30多年里, 伴随高速公路系统的迅速发展, 一系列恶劣的后果也随之产生. 如: 交通拥挤, 环境污染等问题, 都直接导致大量的经济损失. 因此, 目前众多学者致力于自主高速公路系统(automated highway/vehicle systems, AHVS)与智能高速公路系统(intelligent vehicle/highway systems, IVHS)的研究[1~3]. IVHS的结构是车辆以队列的形式, 在领队车辆的带领下, 以较小的车间距离安全行驶. 目前广泛采用的方法是车队的纵向控制[4~6], 因其有效避免车辆控制中的人为失误, 在保证安全性和舒适性的前提下, 有效提高交通容量, 使其成为目前IVHS研究的热点方向之一. 文献[7]提出两种纵向控制的基本方法, 车辆跟随控制和点跟随控制. 文献[8]采用最小数目的车载传感器, 提出一种车队纵向滑模控制策略. 文献[9]提出离散迭代控制算法, 该控制算法利用最优控制理论, 使车队车间距控制达到最优.

IVHS对车队的控制不仅仅要求车队中每辆车都保证稳定, 同时还要求保证车队整体的稳定性(string stability, SS), 即要避免车间距离误差从第一辆跟随车辆向后逐渐增加. 该问题在变车间距控制中并不存在, 因其并不存在车辆间的通讯问题[10]. 对变车间距方法的研究可参看文献[11, 12]. 本文是对定车间距离的车队控制研究, 车队中各个车辆在保证稳定运行的同时, 通过车间的无线通讯来实现车队的整体稳定性. 无线通信的介入, 虽可有效增强车队控制系统的稳定性与鲁棒性, 但无可避免会出现网络延时、丢包及量化等问题. 目前, 已有很多采用网络通讯来实现对车队纵向控制的研究成果. 文献[13, 14]考虑了通讯延时对车队稳定性的影响; 文献[15~17]对存在丢包的纵向车队系统进行状态估计; 文献[18]设计一种通讯控制策略的车辆驾驶辅助系统, 使车队在能见度较低, 交通拥挤的情况下安全行驶.

目前, 对于考虑通讯网络影响下的车队控制存在许多问题亟待解决. 本文主要研究以下两点: a) 文献[13 ∼ 18]考虑网络影响下的车队控制问题, 但都只考虑了网络因素的某一方面(如: 仅考虑延时与丢包其中一个), 对网络的影响因素考虑并不全面; b) 车队通讯信息的传递并不同步(如: 领队车辆的信息传递采用无线网络, 前车信息的传递采用车载传

收稿日期: 2009−11−28; 收修改稿日期: 2010−08−12.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60974013); 霍英东基金资助项目(111066); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NECT–04–0982).

感器完成), 在研究中反馈信息的性质不同往往被忽略. 为了能使控制策略更好的在实践中得以应用, 本文充分考虑以上两点设计控制器, 并对车队控制性能进行分析.

2 建立混合车队模型(Hybrid platoon modeling)

本文用于研究的车队是由n辆在高速公路上沿相同方向行驶的车辆组成, 数学结构如下:

$$\delta_i = x_{i-1} - x_i - \delta_{\mathrm{d}} - L, \tag{1}$$

其中: $x_i(i=1,2,\cdots,n)$是车辆的参考位置, δ_{d}是期望的车间距离, δ_i是期望车间距离与实际距离误差, L是车辆的长度, 控制目标是使所有的误差为零, 车队结构如图1所示.

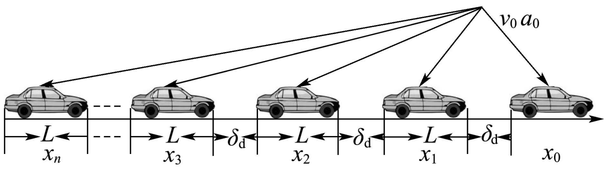

图 1 车队结构

Fig. 1 Structure of the platoon

假设车队行驶的道路水平且不受风速影响, 则第i辆车的纵向动态数学模型描述如下:

$$m_i\ddot{x}_i = F_i - (\sigma A_i c_{\mathrm{d}i}/2)\dot{x}_i^2 - d_{mi}, \tag{2}$$

$$\dot{F}_i = -\frac{F_i}{\varsigma_i(\dot{x}_i)} + \frac{c_i}{\varsigma_i(\dot{x}_i)}. \tag{3}$$

式(2)由牛顿第二定律得到, 式中: F_i是车辆驱动力, σ是空气质量密度, A_i是第i辆车的横截面面积, $C_{\mathrm{d}i}$是阻力系数, d_{mi}是第i辆车的机械阻力, m_i是车的质量, g是重力加速度. 式(3)是第i辆车的发动机模型, ς_i是发动机的时间常数, c_i是第i辆车节气阀输入量.

将式(3)F_i代入式(2)得

$$\dot{F}_i = -\frac{1}{\varsigma_i(\dot{x}_i)}(m_i\ddot{x}_i + \frac{\sigma A_i c_{\mathrm{d}i}}{2}\dot{x}_i^2 + d_{mi}) + \frac{c_i}{\varsigma_i(\dot{x}_i)}. \tag{4}$$

对式(2)两端同时求导, 并将式(4)代入可得三阶非线性模型如下:

$$x_i = -\frac{1}{\varsigma_i(\dot{x}_i)}(\ddot{x}_i + \frac{\sigma A_i c_{\mathrm{d}i}}{2m_i}\dot{x}_i^2 + \frac{d_{mi}}{m_i}) - \frac{\sigma A_i c_{\mathrm{d}i}\dot{x}_i\ddot{x}_i}{m_i} + \frac{c_i}{\varsigma_i(\dot{x}_i)m_i}. \tag{5}$$

对于这类非线性系统, 可设计反馈线性控制器如下:

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

其中:

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

$$b(\dot{x}_i,\ddot{x}_i) = -\frac{1}{\varsigma_i(\dot{x}_i)}(\ddot{x}_i + \frac{\sigma A_i c_{\mathrm{d}i}}{2m_i}\dot{x}_i^2 + \frac{d_{mi}}{m_i}) - \frac{\sigma A_i c_{\mathrm{d}i}\dot{x}_i\ddot{x}_i}{m_i}.$$

进而车队的闭环系统可写为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix} x_i(t) \\ \dot{x}_i(t) \\ \ddot{x}_i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\varsigma_i} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_i(t) \\ \dot{x}_i(t) \\ \ddot{x}_i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\varsigma_i} \end{bmatrix} u_i(t). \tag{6}$$

取采样周期为$h = 20\,\mathrm{ms}$, 离散化后整个车队系统可以写为

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \tag{7}$$

其中:

$$x(k) = [x_1(k)\ \ v_1(k)\ \ a_1(k)\ \ \cdots\ \ x_n(k)\ \ v_n(k)\ \ a_n(k)]^{\mathrm{T}}$$

是离散的状态向量, $u(k) = [u_1(k)\ \ \cdots\ \ u_n(k)]^{\mathrm{T}}$是所有控制输入向量. 在每一个采样时刻, 每一辆车的控制输入$u_i(i=1,2,3,\cdots,n)$可根据车间距离误差、误差变化率、速度变化、加速度变化等输出信息设计如下:

$$u_i(k) = Ky_i(k), \tag{8}$$

其中:

$$K = [k_{\mathrm{p}}\ \ k_{\mathrm{v}}\ \ k_{\mathrm{a}}\ \ k_{\mathrm{vl}}\ \ k_{\mathrm{al}}],$$

$$y_i(k) = [\delta_i\ \ \dot{\delta}_i\ \ \ddot{\delta}_i\ \ v_0 - v_i\ \ a_0 - a_i]^{\mathrm{T}}.$$

由式(8)可知, 保证车队稳定运行需要测量的反馈信息主要有两部分组成, 第1部分为$[\delta_i\ \ \dot{\delta}_i\ \ \ddot{\delta}_i]$, 其测量可以通过车载传感器来完成, 第2部分为$[v_0 - v_i\ \ a_0 - a_i]$, 其测量需经过无线通讯来实现. 而无线通讯网络的引入使得通过它传输的部分反馈量存在量化、延时与丢包等影响因素. 本文的目的就是设计可同时克服这些网络因素影响的车队控制器. 为此, 下一节首先给出这些因素的数学描述, 后续部分将进行控制器设计.

就车队控制系统做以下两点假设:

假设 1 假设输出变量$y(k)$中只有通过网络传输的部分存在量化、网络诱导延时、丢包等问题, 其余部分延时为零(网络结构如图2所示).

假设 2 网络诱导延时是采样周期的整数倍, 即, 整数$\varDelta = \tau/h$, τ为延时, h为采样周期.

为了便于讨论, 这里将测量反馈量$y(k)$写成$y_{\mathrm{o}}(k)$和$y_{\mathrm{c}}(k)$两部分, 其中通过无线网络通讯的量

为

$$y_c(k)=[(v_0-v_i)\ \cdots\ (v_0-v_n)\ \ (a_0-a_i)\ \cdots\ (a_0-a_{n-1})]^{\mathrm T},$$

而车载传感器测量部分为

$$y_o(k)=[\delta_1\ \cdots\ \delta_n\ \ \dot\delta_1\ \cdots\ \dot\delta_n\ \ \ddot\delta_1\ \cdots\ \ddot\delta_n]^{\mathrm T}.$$

设$\hat u(k)$为考虑网络因素后的控制器输出. 进而将车队闭环系统写为

$$x(k+1)=Ax(k)+B\hat u(k), \tag{9}$$

$$y(k)=\begin{bmatrix}y_o(k)\\ y_c(k)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_o\\ C_c\end{bmatrix}x(k), \tag{10}$$

$$\hat u(k)=Ky(k). \tag{11}$$

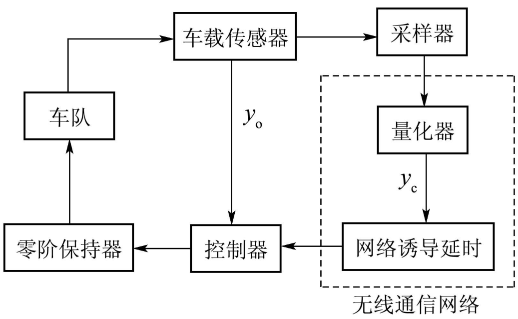

图 2 车队网络结构图

Fig. 2 Structure of platoon with networked constraints

本文考虑如图2所示的车队控制系统, 经网络传输的输出变量$y_c(k)$首先经过量化器量化, 然后由无线网络传输到控制器. 这里所采用的量化器为无记忆时不变型, 用符号$f(\cdot)$表示, 假设该量化器是对称的, 即, $f(-v)=-f(v)$. 相应的量化级集合可以描述如下:

$$U=\{\pm u_i e=0,\pm1,\pm2\cdots\}\cup\{0\}. \tag{12}$$

文献[19, 20]指出, 如果量化器的量化级可以描述为

$$U=\{\pm u_i q_i=\rho^i u_0, i=0,\pm1,\pm2,\cdots\}\cup\{u_0\}\cup\{0\},\ 0<\rho<1,\ u_0>0, \tag{13}$$

则该量化器称作对数量化器.

上述对数量化器的每一个量化等级u_i都对应一个片段v_i, 量化器函数$f(\cdot)$将每个片段都映射成集合U的一个元素. 对于该对数量化器的量化函数$f(\cdot)$可以描述如下:

$$f(v)=\begin{cases}u_i, & \dfrac{1}{1+\xi}u_i<v\leqslant\dfrac{1}{1-\xi}u_i,\ v>0,\\ 0, & v=0,\\ -f(-v), & v<0.\end{cases} \tag{14}$$

其中$\xi=\dfrac{1-\rho}{1+\rho}$.

采用该量化器后车队的反馈控制器可以写为

$$\hat u(k)=K\begin{bmatrix}y_o(k)\\ f(y_c(k))\end{bmatrix}, \tag{15}$$

其中K为反馈控制增益.

设控制器数据更新时刻为$k(k=1,\cdots,\infty)$, 下一次控制器数据更新时刻$k+1$前, 如果信号在传输过程中出现丢包, 丢包数为$\theta(\theta<\theta_m)$, θ_m为最大丢包数, 则在此车队的控制过程中, 把θ个丢包考虑为θ个采样周期的延时. 如果信号成功从传感器传送到控制器, 则信号在无线网络中的延时为τ, 传感器到量化器之间没有延时. 由上述分析及假设条件(2)可知, 同时考虑延时、丢包和量化因素后, 车队反馈控制器(15)可以写为

$$\hat u(k)=K\begin{bmatrix}y_o(k)\\ f(y_c(k-\Delta-\theta))\end{bmatrix}, \tag{16}$$

其中$\Delta=\tau/h$.

根据文献[19], 若量化特性为式(11)～(14)描述, 兼有式(10)和(16)所示的部分反馈量存在丢包延时情况, 该车队反馈控制律可以写为

$$\hat u(k)=K\begin{bmatrix}C_o\\ 0\end{bmatrix}x(k)+(1+\varphi(k))K\begin{bmatrix}0\\ C_c\end{bmatrix}x(k-\eta), \tag{17}$$

其中: $\varphi(k)\in[-\xi,\xi],\eta=\Delta+\theta$.

结合式(9)和(17)可得车队的混合控制系统模型为

$$x(k+1)=(A+BK\tilde C_o)x(k)+B(1+\varphi(k))K\tilde C_c x(k-\eta), \tag{18}$$

其中: $\tilde C_o=\begin{bmatrix}C_o\\ 0\end{bmatrix},\tilde C_c=\begin{bmatrix}0\\ C_c\end{bmatrix}$.

3 设计保性能控制器(Design a guaranteed cost controller)

前一节建立了考虑网络量化、延时、丢包等问题的车队混合系统模型, 本节则以此为基础设计可保证车队稳定的控制器.

首先定义车队系统的性能指标为

$$J=\sum_{k=0}^{\infty}[x^{\mathrm T}(k)Qx(k)+u^{\mathrm T}(k)Ru(k)], \tag{19}$$

其中Q和R是给定的对称正定加权矩阵.

主要的目标是对闭环系统(18)和性能指标(19), 设计一个形如式(16)所示的保性能反馈控制器, 由式(18)知, 对于具有式(14)量化特性的量化误差$\varphi(k)$, 可将其处理为$(\dfrac{1+\varphi(k)}{2})^{\mathrm T}(\dfrac{1+\varphi(k)}{2})\leqslant I$的不确定

性参数问题. 使得对所有满足$(\frac{1+\varphi(k)}{2})^{\mathrm{T}}(\frac{1+\varphi(k)}{2}) \leqslant I$的不确定性, 闭环系统(18)是渐进稳定的, 且相应的闭环性能指标值满足$J \leqslant J^*$, 其中J^*是某个确定的常数.

定理 1 对闭环车队系统(18)和性能指标(19), 如果存在矩阵K, 对称矩阵P和T, 使得对式(18)所描述的所有不确定性、延时/丢包情况下, 矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} \Pi & A_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}PB_{\mathrm{c}} \\ B_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}PA_{\mathrm{c}} & B_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}PB_{\mathrm{c}}-T \end{bmatrix} < 0 \tag{20}$$

成立, 其中:

$$\begin{aligned} \Pi = {} & A_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}PA_{\mathrm{c}} - P + (K\tilde{C}_{\mathrm{c}})^{\mathrm{T}}TK\tilde{C}_{\mathrm{c}} + \\ & Q + (KC)^{\mathrm{T}}RKC, \\ A_{\mathrm{c}} = {} & A + BK\tilde{C}_{\mathrm{o}}, \\ B_{\mathrm{c}} = {} & B(1+\varphi(k)), \end{aligned}$$

则式(17)是系统的一个保性能控制律.

证 选取Lyapunov函数

$$V(k) = x^{\mathrm{T}}(k)Px(k) + \sum_{i=1}^{\eta} x^{\mathrm{T}}(k-i)(K\tilde{C}_{\mathrm{c}})^{\mathrm{T}}TK\tilde{C}_{\mathrm{c}}x(k-i), \tag{21}$$

则$V(k)$是正定的. 沿闭环系统(18)的任意轨线, $V(k)$的前向差分是

$$\begin{aligned} & \Delta V(k) = V(k+1) - V(k) = \\ & x^{\mathrm{T}}(k+1)Px(k+1) - x^{\mathrm{T}}(k)Px(k) + \\ & \sum_{i=1}^{\eta} x^{\mathrm{T}}(k+1-i)(K\tilde{C}_{\mathrm{c}})^{\mathrm{T}}TK\tilde{C}_{\mathrm{c}}x^{\mathrm{T}}(k+1-i) - \\ & \sum_{i=1}^{\eta} x^{\mathrm{T}}(k-i)(K\tilde{C}_{\mathrm{c}})^{\mathrm{T}}TK\tilde{C}_{\mathrm{c}}x^{\mathrm{T}}(k-i) = \\ & [A_{\mathrm{c}}x(k) + B_{\mathrm{c}}K\tilde{C}_{\mathrm{c}}x(k-\eta)]^{\mathrm{T}}P[A_{\mathrm{c}}x(k) + \\ & B_{\mathrm{c}}K\tilde{C}_{\mathrm{c}}x(k-\eta)] - x^{\mathrm{T}}(k)Px(k) + \\ & x^{\mathrm{T}}(k)(K\tilde{C}_{\mathrm{c}})^{\mathrm{T}}T(K\tilde{C}_{\mathrm{c}})x(k) - \\ & x^{\mathrm{T}}(k-\eta)(K\tilde{C}_{\mathrm{c}})^{\mathrm{T}}T(K\tilde{C}_{\mathrm{c}})x(k-\eta) = \\ & \begin{bmatrix} x(k) \\ K\tilde{C}_{\mathrm{c}}x(k-\eta) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \cdot \\ & \begin{bmatrix} \Pi - Q - (KC)^{\mathrm{T}}RKC & A_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}PB_{\mathrm{c}} \\ B_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}PA_{\mathrm{c}} & B_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}PB_{\mathrm{c}} - T \end{bmatrix} \cdot \\ & \begin{bmatrix} x(k) \\ K\tilde{C}_{\mathrm{c}}x(k-\eta) \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{22}$$

从条件(20), 可得对所有允许的不确定性,

$$\begin{aligned} & \Delta V(k) < -x^{\mathrm{T}}(k)[Q + (KC)^{\mathrm{T}}RKC]x(k) \leqslant \\ & -\lambda_{\min}[Q + (KC)^{\mathrm{T}}RKC]\left\|x(k)\right\|^2, \end{aligned} \tag{23}$$

其中: $\lambda_{\min}(\cdot)$表示矩阵$(\cdot)$的最小特征值. 由Lyapunov稳定性定理, 闭环系统(18)是渐进稳定的. 进而, 从不等式(20)得到

$$-\Delta V(k) > x^{\mathrm{T}}(k)[Q + (KC)^{\mathrm{T}}RKC]x(k).$$

对上式两边k从0到∞求和, 并利用系统稳定性, 可得

$$\begin{aligned} J \leqslant {} & x^{\mathrm{T}}(0)Px(0) + \\ & \sum_{i=1}^{\eta} x^{\mathrm{T}}(-i)(K\tilde{C}_{\mathrm{c}})^{\mathrm{T}}TK\tilde{C}_{\mathrm{c}}x(-i). \end{aligned} \tag{24}$$

这就说明了式(17)是系统的一个保性能控制律.

证毕.

引理 1 给定适当维数的矩阵N, L和M, 其中Y是对称的, 则

$$N + LFM + M^{\mathrm{T}}F^{\mathrm{T}}L^{\mathrm{T}} < 0$$

对所有满足$F^{\mathrm{T}}F \leqslant I$的矩阵$F$成立, 当且仅当存在一个$\varepsilon > 0$, 使得

$$N + \varepsilon LL^{\mathrm{T}} + \varepsilon^{-1}M^{\mathrm{T}}M < 0$$

成立.

以下定理2用一个线性矩阵不等式的可行性给出该车队控制系统(7)的保性能控制律的存在条件, 并用线性矩阵不等式的可行解给出了保性能控制律的构造方法.

引理 2 对车队闭环系统(18)和给定性能指标(19), 如果存在一个指标$\varepsilon > 0$, 矩阵$W, U \in \mathbb{R}^{m\times n}$, 对称矩阵$X$和$Y \in \mathbb{R}^{m\times m}$使得

$$\begin{bmatrix} -X+4\varepsilon BB^{\mathrm{T}} & AX+BW & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (AX+BW)^{\mathrm{T}} & -X & 0 & 0 & U^{\mathrm{T}} & X & (W+U)^{\mathrm{T}} \\ 0 & 0 & -Y & Y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y & -\varepsilon I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & U & 0 & 0 & -Y & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & -Q^{-1} & 0 \\ 0 & W+U & 0 & 0 & 0 & 0 & -R^{-1} \end{bmatrix} < 0 \tag{25}$$

成立, 则有保性能控制律为

$$u(k) = WX^{-1}x(k) + UX^{-1}(1+\varphi(k))x(k-\eta). \tag{26}$$

证 矩阵不等式(20)可以写成

$$\begin{bmatrix} A_{\rm c}^{\rm T} \\ B_{\rm c}^{\rm T} \end{bmatrix} P[A_{\rm c} \quad B_{\rm c}] + \begin{bmatrix} -P+(K\tilde{C}_{\rm c})^{\rm T}TK\tilde{C}_{\rm c}+Q+(KC)^{\rm T}RKC & 0 \\ 0 & -T \end{bmatrix} < 0,$$

根据Schur补性质, 上式等价于

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & A_{\rm c} & B_{\rm c} \\ A_{\rm c}^{\rm T} & -P+(K\tilde{C}_{\rm c})^{\rm T}TK\tilde{C}_{\rm c}+Q+(KC)^{\rm T}RKC & 0 \\ B_{\rm c}^{\rm T} & 0 & -T \end{bmatrix} < 0.$$

通过在以上矩阵不等式中代入矩阵$A_{\rm c}$和$B_{\rm c}$的表达式, 该矩阵不等式可进一步等价写成

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & A+BK\tilde{C}_{\rm o} & 0 \\ (A+BK\tilde{C}_{\rm o})^{\rm T} & -P+(K\tilde{C}_{\rm c})^{\rm T}T(K\tilde{C}_{\rm c})+Q+(KC)^{\rm T}RKC & 0 \\ 0 & 0 & -T \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 2B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} (\frac{1+\varphi(k)}{2})[0 \quad 0 \quad I] + [0 \quad 0 \quad I]^{\rm T}(\frac{1+\varphi(k)}{2})^{\rm T} \begin{bmatrix} 2B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\rm T} < 0. \tag{27}$$

根据引理1, 并应用Schur补性质, 上式对所有允许的不确定性成立, 当且仅当存在一个$\varepsilon > 0$, 使得

$$\begin{bmatrix} -P^{-1}+4\varepsilon BB^{\rm T} & A+BK\tilde{C}_{\rm o} & 0 & 0 \\ (A+BK\tilde{C}_{\rm o})^{\rm T} & -P+(K\tilde{C}_{\rm c})^{\rm T}TK\tilde{C}_{\rm c}+Q+(KC)^{\rm T}RKC & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -T & I \\ 0 & 0 & I & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0. \tag{28}$$

对以上不等式分别左乘和右乘矩阵

$$\begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix},$$

并记

$X=P^{-1}$, $W=K\tilde{C}_{\rm o}P^{-1}$, $Y=T^{-1}$, $U=K\tilde{C}_{\rm c}P^{-1}$,

再次应用Schur补性质, 即可得到矩阵不等式(25). 根据定理1, 车队存在保性能控制律.

证毕.

4 设计γ-H$_\infty$控制器(Design a γ-H$_\infty$ controller)

上一节的控制器只考虑了车队控制系统中存在量化、延时和丢包等因素, 未考虑领队车辆变速对车队的干扰. 本节从更加实用的角度出发, 设计能适应领队车辆变速对车队的干扰的一种次优控制器, 即$\gamma-$次优H$_\infty$控制器.

考虑领队车辆加速度对车队的干扰, 车队系统可写为

$$\begin{aligned} &x(k+1)=Ax(k)+Bu(k)+Ew(k), \\ &z(k)=Gx(k)+Du(k)+Fw(k). \end{aligned} \tag{29}$$

其中: $w(k)$ 为领队车辆的加速度, 且满足 $w\triangleq\{w(k)\}\in[0,\infty)$; $x(k)$, $u(k)$与式(7)中描述相同. 在车队控制过程中笔者所关心的变量是车队间误差与领队车辆加速度变化间的关系, 设D, F为零, A, B, G, E是已知的系统矩阵. 考虑网络因素后可以得到该车队的闭环控制系统如下:

$$\begin{cases} x(k+1)= \\ [A+BK\tilde{C}_{\rm o}]x(k)+B(1+ \\ \varphi(k))K\tilde{C}_{\rm c}x(k-\eta)+Ew(k), \\ z(k)=Gx(k). \end{cases} \tag{30}$$

本节的目标是设计γ-H$_\infty$控制器使闭环系统(30)渐进稳定, 且在零输入初始条件下, 从外部扰动$w(k)$到被调输出$z(k)$满足$\|z\|_2\leqslant\gamma\|w\|_2$, $\forall r\in {\rm L}_2[0,\infty)$.

定理 2 对给定的常数$\gamma>0$, 车队闭环系统(30)存在γ-H$_\infty$控制器的充分必要条件是存在正定对称矩阵P和T, 使得对所有允许的参数不确定性, 以下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \pi & 0 & 0 & A_{\rm c}^{\rm T} & G^{\rm T} \\ 0 & -T & 0 & B_{\rm c}^{\rm T} & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma^2 I & E^{\rm T} & 0 \\ A_{\rm c} & B_{\rm c} & E & -P^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \tag{31}$$

其中$\pi=-P+(K\tilde{C}_{\rm c})^{\rm T}TK\tilde{C}_{\rm c}$

证 设Lyapunov函数同式(20), 假设$w(k)=$

0时, 同样有$V(k)$的前向差分$\Delta V(k) < 0$, 因此, 闭环系统(30)是渐进稳定的.

进而, 对任意非零的$w \in \mathrm{L}_2[0,\infty)$,

$$\Delta V(k)+z^{\mathrm{T}}(k)z(k)-\gamma^2 w^{\mathrm{T}}(k)w(k)=\begin{bmatrix} x(k)\\ K\tilde{C}_{\mathrm{c}}x(k-\eta)\\ w(k)\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\left(\begin{bmatrix}A_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\\ B_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\\ E^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}P[A_{\mathrm{c}}\ \ B_{\mathrm{c}}\ \ E]+\begin{bmatrix}-P+(K\tilde{C}_{\mathrm{c}})^{\mathrm{T}}TK\tilde{C}_{\mathrm{c}} & 0 & 0\\ 0 & -T & 0\\ 0 & 0 & -\gamma^2 I\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}G^{\mathrm{T}}\\ 0\\ 0\end{bmatrix}[G\ \ 0\ \ 0]\right)\begin{bmatrix} x(k)\\ K\tilde{C}_{\mathrm{c}}x(k-\eta)\\ w(k)\end{bmatrix},$$

应用矩阵的Schur补性质可得不等式矩阵(31), 进一步可得

$$\Delta V(k)+z^{\mathrm{T}}(k)z(k)-\gamma^2 w^{\mathrm{T}}(k)w(k)<0,\ \forall k>0.$$

由零初始条件, 可得

$$\sum_{i=1}^{N} z^{\mathrm{T}}(k)z(k)-\gamma^2\sum_{i=1}^{N} w^{\mathrm{T}}(k)w(k)\leqslant 0,$$

即, 被调输出$z(k)$满足$\|z\|_2\leqslant\gamma\|w\|_2$, 其中$\|\cdot\|_2$表示$\mathrm{L}_2[0,\infty)$中的标准范数. 证毕.

定理 3 存在对称正定矩阵P,T, 使得对所有的不确定性矩阵φ, 矩阵(30)成立, 当且仅当关于$\varepsilon>0,\ X>0,\ Y>0$的线性矩阵不等式

$$\begin{bmatrix}-X & 0 & 0 & (AX+BW)^{\mathrm{T}} & (GX)^{\mathrm{T}} & 0 & U^{\mathrm{T}}\\ 0 & -Y & 0 & 0 & 0 & Y & 0\\ 0 & 0 & -\gamma^2 I & E^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0\\ AX+BW & 0 & E & -X+\varepsilon BB^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0\\ GX & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0\\ 0 & Y^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon I & 0\\ U & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Y\end{bmatrix}<0 \quad (32)$$

是可行的.

证 与定理2证明过程相同, 求得不等式矩阵(31)的可行解, 即可得到H∞控制器.

5 仿真试验(Simulation)

为了检验本文控制方法的有效性, 并与文献[6]不考虑车队通讯网络影响下所设计控制器做一比较, 笔者对由5辆车所组成的车队进行了仿真. 仿真中车辆参数设为: 空气质量密度$\sigma=1\,\mathrm{m/s^3}$, 车的横截面面积$A_i=2.2\,\mathrm{m}^2$, 阻力系数$c_{\mathrm{d}i}=0.35$, 车的机械阻力$d_{mi}=5\,\mathrm{N}$, 车的质量$m_i=1464\,\mathrm{kg}$, 得到非线性车辆模型为

$$x_i=-\frac{1}{\varsigma_i}(\ddot{x}_i+\frac{0.49}{1464}\dot{x}_i^2+\frac{5}{1464})-\frac{0.92\ddot{x}_i\dot{x}_i}{1464}+\frac{c_i}{1464\varsigma_i}.$$

反馈线性控制器为

$$c_i=1464u_i+0.49\dot{x}_i^2+5+0.92\ddot{x}_i\dot{x}_i\varsigma_i.$$

由发动机时间常数$\varsigma_i=0.1$, 进而得到车辆线性状态空间方程为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}x_i(t)\\ \dot{x}_i(t)\\ \ddot{x}_i(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & -10\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_i(t)\\ \dot{x}_i(t)\\ \ddot{x}_i(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 10\end{bmatrix}u_i(t).$$

另设: 丢包数$\theta=2$, 延时$\tau=2$, 量化密度$\rho=0.4$, 发动机时间常数$\varsigma=0.1$.

车队运行状态为: 领队车辆以0 m/s的初始速度, 加速到20 m/s后, 再减速到12 m/s, 车辆间距假设为3 m, 车辆长度为1 m.

1) 不考虑网络通讯影响的PID控制器:

$$k_{\mathrm{p}}=13.6,\ k_{\mathrm{v}}=2.6,$$
$$k_{\mathrm{a}}=0.7,\ k_{\mathrm{vl}}=-2.6,\ k_{\mathrm{al}}=2.3.$$

2) 考虑网络通信影响下保性能控制器:

$$k_{\mathrm{p}}=10,\ k_{\mathrm{v}}=0.9,\ k_{\mathrm{a}}=2,\ k_{\mathrm{vl}}=2.4,\ k_{\mathrm{al}}=1.$$

3) 考虑网络通信影响下H∞控制器:

$$k_{\mathrm{p}}=15,\ k_{\mathrm{v}}=1,\ k_{\mathrm{a}}=2,\ k_{\mathrm{vl}}=0,\ k_{\mathrm{al}}=-0.2,$$

设$\gamma=1$.

领队车辆速度v_0和加速度a_0曲线, 如图3所示. 通过比较图4, 5可以看出, 考虑网络影响下PID控制器车间距误差达2 m以上, 且由图5知控制过程中车队抖动剧烈, 无论从安全性还是乘车的舒适性上考虑都存在缺点. 而采用本文设计的保性能控制器如图6, 7所示, 车间距离误差仅有0.42 m, 大大改善了车队的安全性, 且车队在12 s达到稳定运行状态, 比前者相应速度更快, 相应的混合车队系统性能指标上界$J^*=488.6$.

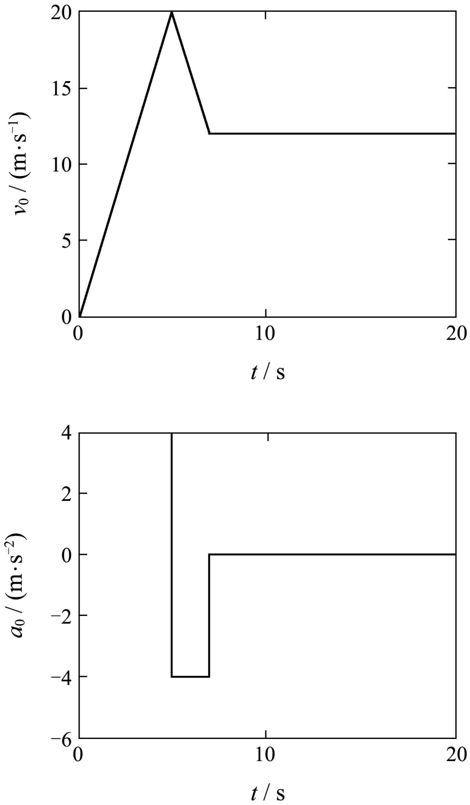

图 3 领队车辆速度、加速度曲线

Fig. 3 Profile of the lead vehicle

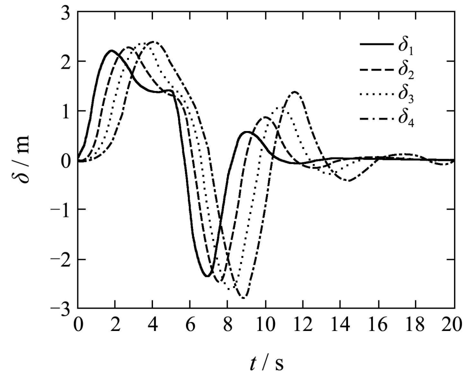

图 4 PID控制器车队车间距离误差曲线

Fig. 4 Spacing errors under PID controller

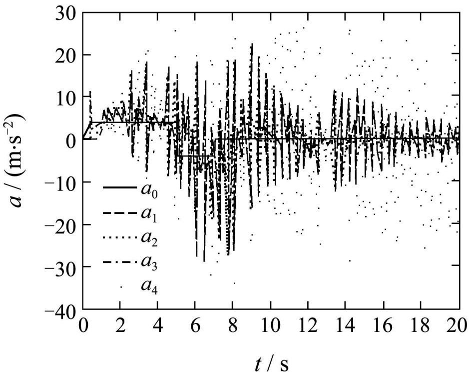

图 5 PID控制器车辆加速度曲线

Fig. 5 Acceleration profile under PID controller

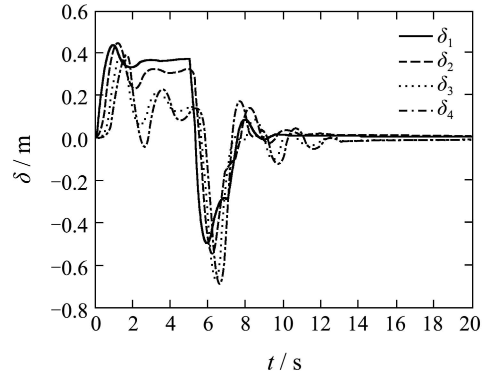

图 6 保性能控制器车队车间距离误差曲线

Fig. 6 Spacing errors under guaranteed cost controller

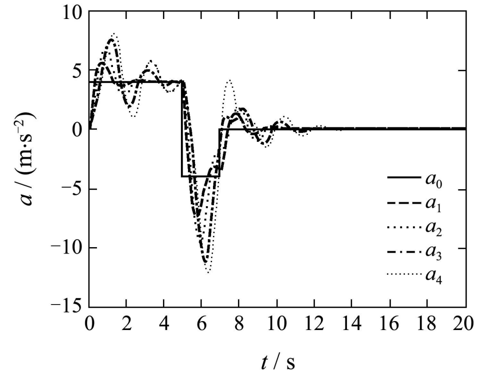

图 7 保性能控制器车辆加速度曲线

Fig. 7 Acceleration profile under guaranteed cost controller

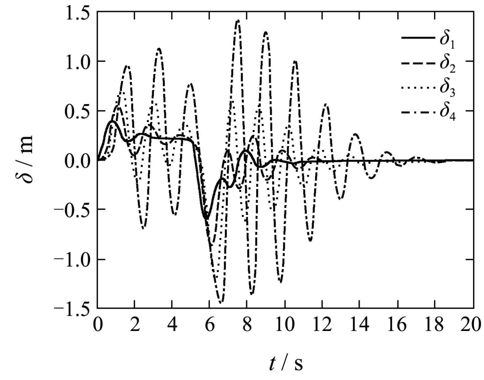

图 8 H$_\infty$控制器车队车间距离误差曲线

Fig. 8 Spacing errors under H$_\infty$ controller

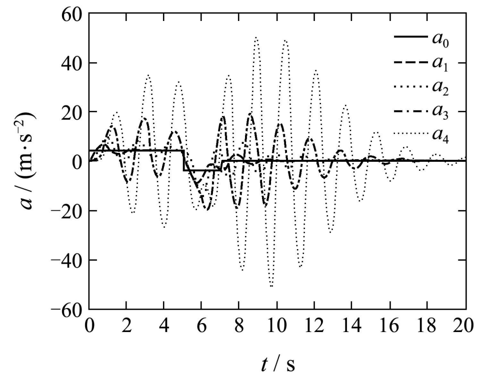

图 9 保性能控制器车辆加速度曲线

Fig. 9 Acceleration profile under H$_\infty$ controller

对于考虑领队车辆的干扰的H_∞控制器仿真曲线如图8, 9, 车间距误差达1.4 m, 从安全性上考虑不如前者, 但其更全面的考虑了车队运行过程中的各种因素, 更有利于在实际中得以应用.

6 结论(Conclusions)

本文考虑在车队行驶过程中, 车辆间通讯网络存在量化、延时及丢包等因素影响下, 建立混合车队控制系统模型, 并针对问题设计保性能控制器, 改善了车队的控制性能. 另外, 针对领队车辆加速度对车队的干扰, 设计出保证车队稳定的H_∞控制器, 更有利于在实际中得以应用.

本文主要研究在车队纵向控制中, 由无线通讯网络的介入所引起控制问题, 目前正在着手解决车辆的横向–纵向综合控制问题, 可望得到更加有效实用的控制方法.

参考文献(References):

[1] RAZA H, IOANNOU P. Vehicle following control design for automated highway systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1996, 16(6): 43 – 60.

[2] HUANG S, W REN SAFETY. Comfort, and optimal tracking control in ahs applications[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Magazine*, 1998, 18(4): 50 – 64.

[3] TAI M, HINGWE P. Modeling and control of steering system of heavy vehicles for automated highway systems[J]. *IEEE Transactions on Mechatronics,* 2004, 9(5): 609 – 618.

[4] RAJAMANI R, ZHU C. Semi-autonomous adaptive cruise control systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2002, 51(5): 1186 – 1192.

[5] IOANNOU P. Guest editorial adaptive cruise control systems special issue[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2003, 4(3): 113 – 114.

[6] SWAROOP D, HEDRICK J K. String stability of interconnected dynamic systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, 41(3): 349 – 357.

[7] SHLADOVER S E. Longitudinal control of automotive vehicles in close formation platoons[J]. *Journal of Dynamic System Measure Control*, 1991, 113(2): 231 – 241.

[8] ANTONELLA FERRARA. PIERLUIGI PISU. Minimum sensor second-order sliding mode longitudinal control of passenger vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2004, 5(1): 20 – 32.

[9] STANKOVIC S S, STANOJEVIC M J, SILJAK D D. Decentralized overlapping control of a platoon of vehicles[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology,* 2000, 8(5): 816 – 831.

[10] SWAROOP D, HEDRICK J K, CHOI S B. Direct adaptive longitudinal control of vehicle platoons[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology,* 2001, 50(1): 150 – 161.

[11] IOANNOU P. Guest editorial adaptive cruise control systems special issue[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2003, 4(3): 113 – 114.

[12] SWAROOP D, HEDRICK J K, CHIEN C C, et al. Comparison of spacing and headway control laws for automatically controlled vehicles[J]. *Vechile System Dynamic*, 1994, 23(8): 597 – 625.

[13] HUANG S, W REN SAFETY. Comfort, and optimal tracking control in AHS applications[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Magazine*, 1998, 18(4): 50 – 64.

[14] LIU X H, GOLDSMITH A, MAHAL S S, et al. Effects of communication delay on string stability in vehicle platoons[C] //*IEEE Proceedings on Intelligent Transportation Systems*. New York: IEEE, 2001, 625 – 630.

[15] SEILER P, SENGUPTA R. Analysis of communication losses in vehicle control problems[C] //*Proceedings of the American control Conference.* New York: IEEE, 2001: 1491 – 1496.

[16] PETER S, RAJA S. An $H\infty$ approach to networked control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control,* 2005, 50(3): 356 – 364.

[17] RODNEY T, DUSAN M. Decentrlized spacing control of a string of multiple vehicles over lossy datalinks[C] //*IEEE Proceedings on D&C Maui*. New York: IEEE, 2003: 682 – 687.

[18] PAOLO CARAVANI, ELENA DE SANTIS, FABIO GRAZIOSI, et al. Communication control and driving assistance to a platoon of vehicles in heavy traffic and scarce visibility[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* 2006, 7(4): 448 – 460.

[19] ELIA N, MITTER S K. Stabilization of linear systems with limited information[J]. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2001, 46(9): 1384 – 1400.

[20] FU M, SHAKED U. The sector bound approach to quantized feedback control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control,* 2005, 50(11): 1698 – 1711.

作者简介:

岳 伟 (1981—), 男, 博士研究生, 从事自主车队控制研究, E-mail: yuewei811010@163.com;

郭 戈 (1972—), 男, 教授, 博士生导师, 从事控制系统分析与综合、工业过程控制、移动机器人的研究, E-mail: guoge@yeah.com.