文章编号: 1001-0920(2004)05-0589-03

网络化控制系统的信息调度与稳定性研究

谢林柏, 方华京, 王 华
(华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 针对具有通信约束的变速率网络化控制系统模型, 研究在有系统信息丢失的情形下闭环系统的渐近稳定性问题; 同时针对框架化的信息调度方法, 探讨了在给定网络变速率采样模式下, 通过设计动态反馈控制律保持闭环系统渐近稳定的方法来评判信息调度方法的适定性

关键词: 网络化控制系统; 变速率采样; 渐近稳定; 线性矩阵不等式
中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

Information scheduling and asymptotical stability of networked control systems

XIE Lin-bo, FANG Hua-jing, WANG Hua
(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China. Correspondent: XIE Lin-bo, E-mail: xlbzyf@sohu.com)

Abstract: The asymptotical stabilization problem of networked control systems is studied under communication constraints which cause system information loss The stability and performance of the closed loop system are then not only determined by the characteristics of the control system, but also determined by the scheduling manner imposed by network. A simple information scheduling scheme is presented and the admissibility problem of such information scheduling approach is also studied through the stability justification of the closed loop system for given sampling manner. A numerical example illustrates the proposed method.

Key words: networked control systems; varying sampling rate; asymptotically stable; linear matrix inequality

1 引 言

网络化控制系统(NCS)的特点在于反馈控制系统中的控制回路是通过网络信道连接而形成闭环[1,2]. 可将控制回路中所嵌入的网络系统结构大致分为广义网络化系统和狭义网络化系统 DeviceNet, ControlNet 以及 LonWorks[2] 等均可归纳为狭义的网络化系统, 而在广域计算机网和 Internet 等网络上构筑的控制系统则可视为广义网络化系统 这是一种完全分布式的控制方式

与传统意义上的控制系统相比, 网络化系统有许多优点, 如减少系统的连接线, 节约系统集成的成本, 实现资源共享, 便于系统安装、维护、扩展和故障诊断等 当然, 由于网络本身所具有的特性, 它的引入同时也会带来很多新的问题, 如网络带宽资源的有限性, 信息传送中的延迟, 分布式的控制方式等 因此, 网络化控制系统的研究要比通常的控制系统复杂和困难

本文考虑一种具有变速率采样方式的网络化控

收稿日期: 2003-04-11; **修回日期**: 2003-06-02
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60274014); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20020487006); 教育部智能制造技术重点实验室开放基金资助项目(Imstu-2002-03).
作者简介: 谢林柏(1974—), 男, 湖南永州人, 博士, 从事网络化控制、鲁棒控制的研究; 方华京(1955—), 男, 浙江黄岩人, 教授, 博士生导师, 从事网络化控制系统、控制系统故障诊断等研究

制系统,研究该系统在有信息丢失的情况下闭环系统渐近稳定性问题及其信息调度方法.

2 信息调度方法

本文考虑的系统如图 1 所示. 其中,传感器、执行器以及控制器均为网络中的独立节点,连续对象分别连接执行器和传感器.

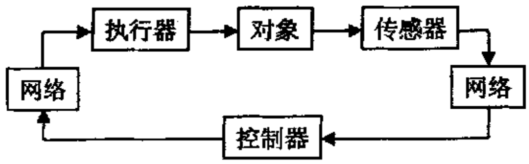

图 1 网络化控制系统示意图

网络带宽的有限容量以及不同信道间信息量多少的差异,是促使网络化系统采用变速率采样方式的原因之一. 通常意义下的异步采样模式可视为一种变速率采样方式. 由于网络带宽有限,在同一时刻,网络只能传送系统的有限输入输出信号,这表明有部分系统信号丢失了,因此有可能造成系统不稳定或系统的性能达不到要求. 而在传统的控制系统中,则不存在信息资源的分配问题.

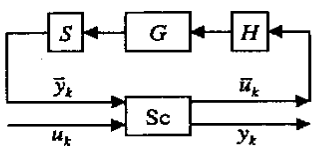

图 2 信息调度方法框图

在有通信约束的情形下,信息调度的基本方法如图2所示. 图中,G 为控制系统对象,S 和 H 分别为采样器和保持器,Sc 为信息调度方法,即网络对控制系统施加的影响;$\overline{y}_k$, $\overline{u}_k$, y_k 和 u_k 分别为系统输出信号、系统输入信号、控制器输入信号和控制器输出信号,它们均为离散信号. 设连续对象 G 的状态方程为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\overline{u}(t), \tag{1}$$

$$\overline{y}(t) = Cx(t) \tag{2}$$

其中:$x(t) \in R^n$, $\overline{u}(t) \in R^{n_u}$, $\overline{y}(t) \in R^{n_y}$. 对系统 G 进行变速率采样离散化得 G_d,设采样间隔序列为 h_i, $i = 0, 1, \cdots$,即

$$x_{k+1} = \overline{A}_i x_k + \overline{B}_i \overline{u}_k, \tag{3}$$

$$\overline{y}_k = \overline{C}_i x_k, \tag{4}$$

其中 $\overline{A}_i = e^{Ah_i}$, $\overline{B}_i = \int_0^{h_i} e^{As}B\,ds$, $\overline{C}_i = C$.

令信息调度方法 Sc 为

$$\overline{x}_{k+1} = \overline{A}_j \overline{x}_k + \overline{B}_{1j}\overline{y}_k + \overline{B}_{2j}u_k, \tag{5}$$

$$\overline{u}_k = \overline{C}_{1j}\overline{x}_k + \overline{D}_{11j}\overline{y}_k + \overline{D}_{12j}u_k, \tag{6}$$

$$y_k = \overline{C}_{2j}\overline{x}_k + \overline{D}_{21j}\overline{y}_k + \overline{D}_{22j}u_k, \tag{7}$$

其中:系统状态维数 R^{n_m} 可根据需要确定,系统矩阵 $\overline{A}_j$ 和 $\overline{B}_{1j}$ 等均为常数矩阵,它们的值取决于对系统 G 的信息调度方法. 由 G 和 Sc 可知,在有通信约束情形下,系统模型 G-Sc 为

$$X_{k+1} = A_k X_k + B_k u_k, \tag{8}$$

$$y_k = C_k X_k + D_k u_k, \tag{9}$$

其中

$$X_k = \begin{bmatrix} x_k \\ \overline{x}_k \end{bmatrix}, A_k = \begin{bmatrix} \overline{A}_i + \overline{B}_i\overline{D}_{11j}\overline{C}_i & \overline{B}_i\overline{C}_{1j} \\ \overline{B}_{1j}\overline{C}_i & \overline{A}_j \end{bmatrix},$$

$$B_k = \begin{bmatrix} \overline{B}_i\overline{D}_{12j} \\ \overline{B}_{2j} \end{bmatrix}, C_k = [\overline{D}_{21j}\overline{C}_i \quad \overline{C}_{2j}], D_k = \overline{D}_{22j}.$$

A_k, B_k, C_k 分别为 G 和 Sc 的各种组合的统一表示形式,为保持系统正则,可令 $D_k = 0$. 显然,直接从 Sc 或 G-Sc 的状态方程中很难判断出一个信息调度方法是否适合于系统且是否有效,因此只能从系统的分析与综合上进行验证. 如果在一个信息调度方案下,存在一种控制系统综合方法,使得系统保持渐近(指数)稳定,则称该信息调度方法 Sc 是适定的.

针对上述时变系统,考虑如下动态控制器:

$$x^c_{k+1} = A^c_k x^c_k + B^c_k y_k, \tag{10}$$

$$u_k = C^c_k x^c_k + D^c_k y_k, \tag{11}$$

其中 $x^c_k \in R^{n+n_m}$. 于是可得闭环系统状态方程

$$\widetilde{X}_{k+1} = \begin{bmatrix} A_k + B_kC^c_kC_k & B_kC^c_k \\ B^c_kC_k & A^c_k \end{bmatrix}\widetilde{X}_k, \tag{12}$$

$$y_k = [C_k \quad \mathbf{0}]\widetilde{X}_k, \tag{13}$$

其中 $\widetilde{X}_k = [X^T_k \quad x^{cT}_k]^T$. 可知闭环系统也是一个时变系统,其切换形式由网络采样间隔序列和信息调度方法共同决定.

为了对闭环网络化控制系统进行分析,引入如下引理:

引理 1 给定对称矩阵 Ψ 和矩阵 E, F,存在一个矩阵 Θ 满足矩阵不等式

$$\Psi + F^T\Theta^T E + E^T\Theta F < 0,$$

其充分必要条件是 $W^T_E\Psi W_E < 0$,且 $W^T_F\Psi W_F < 0$. 其中:$\mathrm{Im}W_E = \mathrm{Ker}\,E$, $\mathrm{Im}W_F = \mathrm{Ker}\,F$,即 $W_E = E^{\perp}$, $W_F = F^{\perp}$.

3 主要结果及证明

考虑实际情形,采样间隔序列 h_k 一般为等间隔周期性序列或有限步序列,即 $k = 1, 2, \cdots, N$. 不失一般性,假设给定网络信息调度方法 Sc 后,系统 G-Sc 是一个周期为 N 的系统. 对于闭环系统(12)和(13)的渐近稳定性,有如下结果:

定理 1　如果存在两个正定的矩阵序列 R_k 和 S_k, $k = 1, 2, \cdots, N$, 满足如下线性矩阵不等式:

$$B_k^{\mathrm{T}\perp\mathrm{T}}[A_k R_k A_k^{\mathrm{T}} - R_{k+1}]B_k^{\mathrm{T}\perp} < 0, \tag{14}$$

$$C_k^{\perp\mathrm{T}}[A_k^{\mathrm{T}} S_{k+1} A_k - S_k]C_k^{\perp} < 0, \tag{15}$$

$$\begin{bmatrix} R_k & I \\ I & S_k \end{bmatrix} > 0, \tag{16}$$

则闭环系统(12) 和(13) 是渐近稳定的, 且网络信息调度方法 Sc 是适定的.

证明　闭环系统矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} A_k + B_k D_k^c C_k & B_k C_k^c \\ B_k^c C_k & A_k^c \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} A_k & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & B_k \\ I & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_k^c & B_k^c \\ C_k^c & D_k^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} & I \\ C_k & \mathbf{0} \end{bmatrix} =$$

$$\tilde{A}_k + \tilde{B}_k K_k \tilde{C}_k,$$

令 Lyapunov 函数为 $V(\tilde{X}_k) = \tilde{X}_k^{\mathrm{T}} P_k \tilde{X}_k$, 则由 $\Delta V_k = V(\tilde{X}_{k+1}) - V(\tilde{X}_k) < 0$ 可得

$$\begin{bmatrix} -P_{k+1}^{-1} & \tilde{A}_k \\ \tilde{A}_k^{\mathrm{T}} & -P_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{B}_k \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} K_k [\mathbf{0} \quad \tilde{C}_k] +$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \tilde{C}_k^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} K_k^{\mathrm{T}} [\tilde{B}_k^{\mathrm{T}} \quad \mathbf{0}] < 0. \tag{17}$$

由引理 1 可知, 式(17) 成立的充要条件是

$$W_E^{\mathrm{T}} H_p W_E < 0 \text{ 且 } W_F^{\mathrm{T}} H_p W_F < 0 \tag{18}$$

成立. 其中

$$E = [\tilde{B}_k^{\mathrm{T}} \quad \mathbf{0}], F = [\mathbf{0} \quad \tilde{C}_k],$$

$$W_E = \begin{bmatrix} \tilde{B}_k^{\mathrm{T}\perp} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & I \end{bmatrix}, W_F = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & I \\ \tilde{C}_k^{\perp} & \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

H_p 为式(17) 第一项. 将 W_E 和 W_F 代入式(18), 并令

$$P_k = \begin{bmatrix} S_k & N_k \\ N_k^{\mathrm{T}} & L_k \end{bmatrix}, P_k^{-1} = \begin{bmatrix} R_k & \bar{N}_k \\ \bar{N}_k^{\mathrm{T}} & \bar{L}_k \end{bmatrix},$$

$R_k, S_k > 0$, 结合 $\tilde{B}_k$ 和 $\tilde{C}_k$ 的表示式可知, 式(18) 中的两式分别等价于式(14) 和(15), $P_k > 0$ 等价于式(16). □

4　仿真研究

考虑一不稳定的系统 Σ:

$$A = \begin{bmatrix} -2.1707 & -1.0107 \\ -0.0592 & 0.6144 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.3803 & -0.0196 \\ -1.0092 & -0.0483 \end{bmatrix},$$

$$C = [-0.3179 \quad -1.8740].$$

设网络采样间隔序列 $h_k \in \{0.1, 0.2\}$. 采用切换型信息调度方式和如下异步采样型信息调度方式:

$$\bar{A}_j = \mathbf{0}_{2\times 2}, \bar{B}_{1j} = \mathbf{0}_{2\times 1},$$

$$\bar{B}_{2j} \in \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\}, \bar{C}_{1j} = I_2,$$

$$\bar{C}_{2j} = \mathbf{0}_{1\times 2}, \bar{D}_{12j} = \bar{B}_{2j}, \bar{D}_{12j} = 1.$$

在上述两种信息调度方法下, 每个闭环系统均由两个子系统 Φ_{i1} 和 Φ_{i2} $(i = 1, 2)$ 组成. 通过验证, 各个闭环子系统均不是稳定的系统, 但由子系统组成的整个系统 $\Phi_i = \Phi_{i1}\Phi_{i2}$ $(i = 1, 2)$ 则是稳定的. Φ_1 和 Φ_2 的闭环极点分别为

0.9346, 0.5190, 0.0002, 0(5);

0.6495, 0.5296, 0.2484, 0.0002, 0(4).

仿真结果表明, 所采用的信息调度方法在变速率的采样模式下, 能保持闭环系统的渐近稳定, 即它们是适定的.

5　结　论

本文研究了具有带宽约束的变速率网络化控制系统的信息调度与闭环系统的渐近稳定性问题. 由于网络化系统中控制与通信相互耦合, 闭环系统的稳定性不仅与控制系统本身有关, 在很大程度上还要受网络系统的采样模式以及信息分配方式的影响. 文中针对一种信息调度方法框架, 通过设计动态控制律, 保持了闭环系统的渐近稳定性, 同时检验了所指定的信息调度方法的适定性.

参考文献(References):

[1] Gregory C Walsh, Hong Ye, Linda Bushnell. Stability analysis of networked control systems[A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. San Diego, 1999. 2876-2880.

[2] Lian Feng-li, James R Moyne, Dawm M Tilbury. Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet and DeviceNet[J]. *IEEE Contr Syst Mag*, 2001, 21(1): 66-83.

[3] Dimitrios Hristu. Stabilization of LTI systems with communication constraints[A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. Chicago, 2000. 2342-2346.

[4] Hisaya Fujioka, Kensaku Ito. Sensor/actuator scheduling for control systems with communication constraints[A]. *The 4th Asian Control Conf* [C]. Singapore, 2002. 590-595.

[5] Geir E Dullerud, Sanjay Lall. A new approach for analysis and synthesis of time-varying systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(8): 1486-1497.

[6] Gahinet P, Apkarian P. A linear matrix inequality approach to H-infinity control[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 1994, 4(4): 421-448.