

一类多包传输网络控制系统的 H_∞ 鲁棒控制

谢成祥^{1,2}, 胡维礼²

(1. 江苏科技大学 电子与信息学院, 江苏 镇江 212003; 2. 南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 研究了一类不确定时延多包传输网络控制系统的最优 H_∞ 控制问题. 针对传感器时钟驱动、控制器和执行器事件驱动的多包传输网络控制系统, 考虑不大于一个采样周期的不确定时延和有限能量的外部扰动, 提出一种基于模型的反馈控制策略, 利用Lyapunov理论推导了 H_∞ 控制律存在的充分条件, 通过求解矩阵不等式约束的优化问题得到最优 H_∞ 控制律. 数值仿真表明了所用方法的有效性.

关键词: 网络控制系统; 多包传输; 最优 H_∞ 控制; 矩阵不等式; H_∞ 扰动抑制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

H-infinity control for a class of networked control systems with multiple packet transmission

XIE Cheng-xiang^{1,2}, HU Wei-li²

(1. School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China;

2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: The optimal H-infinity control problem for a class of networked control systems (NCS) with multiple packet transmission is studied. For networked control systems with clock-driven sensors and event-driven controllers and actuators, when the time-delay is uncertain and less than one sampling period and the external disturbance is limited, the model-based control scheme is proposed, and the sufficient condition of the existence of H-infinity control law is derived by using Lyapunov theory. The optimal H-infinity controller law is obtained through solving a convex optimization problem constrained by matrix inequalities. A numerical simulation example shows the validity of the proposed method.

Key words: networked control systems; multiple packet transmission; optimal H-infinity control; matrix inequality; H-infinity disturbance attenuation

1 引言(Introduction)

网络控制系统(networked control systems, NCS)是通过网络形成闭环的反馈控制系统, 传感器、执行器和控制器等现场设备直接作为智能节点与通信网络相连, 实现信息的交换. 与传统控制系统相比, 网络控制系统降低了系统的连接复杂性, 减少了运行成本和维护费用, 提高了信息集成度. 但是由于通信网络的介入, 必然会导致时延、丢包、时序错乱等问题, 这将很可能导致系统性能下降甚至不稳定. 因此, 网络控制系统的分析和设计已经成为目前控制理论的研究热点之一.

当网络控制系统的传感器等部件的待发数据超出了网络协议所能容纳的范围, 或者系统本身具有多个传感器节点, 各传感器数据不可能同时到达控制器节点时, 网络控制系统的数据必须采用多包传输. 此时, 在一个采样周期内, 一组数据的某些数据

包或者某些传感器的数据可能无法成功传输. 这些问题的存在影响了网络控制系统的性能和稳定性, 同时给系统的建模、分析和设计带来了困难.

到目前为止, 多包传输网络控制系统的研究已经出现了一些研究结果. 文献[1]假设网络只存在于控制器和传感器之间, 传感器为时间驱动, 控制器为事件驱动, 网络诱导时延忽略不计, 研究了网络控制系统的模型描述, 给出了传感器数据被封装成两个数据包时, 网络控制系统稳定性, 但未给出更为一般的网络控制系统的稳定性分析; 文献[2]在网络诱导时延是常数的情况下, 基于切换系统分析方法和稳定性理论得出了网络控制系统指数稳定的充分条件, 但没有得到变时延时控制器的设计方法; 文献[3]在忽略网络传输时延的情况下, 将多包传输网络控制系统描述为一个具有 N 个事件的异步动态系统, 讨论了网络控制系统指数稳定的问题, 并给

出了系统稳定性的充分条件; 文献[4]将具有时延的多包传输网络控制系统, 转化为离散切换控制系统, 取分段Lyapunov函数, 对系统的稳定性及鲁棒性进行了论证, 并以LMI形式给出了系统满足 H_∞ 性能指标 γ 的条件; 文献[5]利用切换系统理论和鲁棒稳定性理论, 得到了多包传输网络控制系统的渐近稳定性判据, 给出了周期动态输出反馈镇定控制器的设计方法, 但经研究发现, 该方法不能用于开环不稳定系统。

本文针对一类网络诱导时延小于一个采样周期的多包传输网络控制系统, 数据包传输采用最大误差优先传输(maximum error first transfer, 简称为MEFT)算法, 提出一种基于模型的控制方法, 在控制器端引入对象模型来估计对象的状态, 利用接收到的数据包对模型状态进行更新, 并用更新之后的模型状态构造控制律。根据Lyapunov稳定性理论推导了 H_∞ 控制律存在的充分条件, 并通过求解矩阵不等式约束的优化问题得到最优 H_∞ 控制律。数值仿真算例验证了文中方法的有效性。

2 多包传输网络控制系统建模(Modeling of NCS with multiple packet transmission)

本章研究的多包传输网络控制系统的结构图如图1所示。

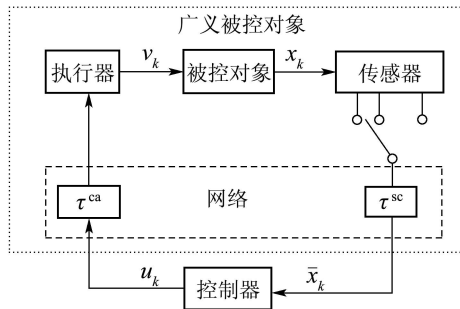


图1 多包传输网络控制系统的结构图

Fig. 1 Scheme of NCS with multiple packet transmission

图中 $x, \tilde{x}, u$ 分别表示对象的状态、控制器的输入及其输出, τ^{sc}, τ^{ca} 分别表示传感器节点-控制器节点、控制器节点-执行器节点之间的网络诱导时延。作如下基本假设:

1) 系统中只有一个定时采样的传感器节点, 采样周期为 $T, T > 0$; 2) 传感器节点的采样数据分成 q 个数据包, 在每个采样时刻, 根据调度协议传输其中的一个数据包, 并将未被传输的数据包丢弃; 3) 控制器节点与执行器节点均为事件驱动, 且控制器节点的数据采用单包传输; 4) 网络传输的总诱导时延 $\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^{ca} \leq T$; 5) 每个数据包具有不同的

标识符, 控制器能准确地辨识所接收的数据的含义。

考虑到以上假设, 控制器的输出 u_k 与对象的输入 $v(t)$ 之间存在如下关系:

$$v(t) = \begin{cases} u_{k-1}, & t_k < t \leq t_k + \tau_k, \\ u_k, & t_k + \tau_k < t \leq t_{k+1}. \end{cases}$$

设线性时不变被控对象的状态方程描述为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_w w(t), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 是对象的状态, $v(t) \in \mathbb{R}^m$ 是对象的输入, $y(t) \in \mathbb{R}^{n_y}$ 是对象输出, $w(t) \in \mathbb{R}^{n_s}$ 为平方可积的外部干扰输入, A, B, B_w, C 为适当维数的常数矩阵。假设对象的状态可以测量, 并记 x_k 为 $x(t)$ 在 k 时刻的采样值。

将包含网络在内的广义被控对象按采样周期离散化, 可得

$$\begin{cases} x_k = Gx_k + (H - DFE)u_k + DFEu_{k-1} + H_w w_k, \\ y = Cx_k. \end{cases} \quad (2)$$

其中: G, H, D 和 E 参见文献[6], $H_w = \int_0^T e^{At} B_w dt$, $F^T F \leq I$ 。

下面考察传感器数据的传输情况。若在第 k 个采样时刻, 控制器节点接收到的有效数据可以表示为 $x_k = \Delta_k x_k$, 其中:

$$\begin{aligned} \Delta_k &\in \{\delta_1, \dots, \delta_q\}, \\ \delta_i &= \text{diag}\{\delta_{i,1}, \dots, \delta_{i,q}\}, \\ \delta_{i,j} &= \begin{cases} I_{p \times p}, & i = j \\ 0_{p \times p}, & i \neq j \end{cases}, \quad i, j = 1, 2, \dots, q, \end{aligned}$$

p 为每个子块的维数, 即每次传输 p 维状态分量, $qp = n$, Δ_k 是时变的, 但其取值是有限的。

控制器节点利用模型来预测系统的状态, 在第 k 个采样时刻用接收到的数据包对模型的相应状态进行更新, 然后对下一采样时刻的状态进行预测, 可表示为

$$\begin{cases} \bar{x}_{k+1} = \bar{G}x_k^+ + H u_k, \\ \bar{x}_k^+ = \Delta_k x_k + \bar{\Delta}_k \bar{x}_k. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\bar{\Delta}_k = I - \Delta_k$, $\bar{x}_k$ 表示 k 时刻的传感器数据到达控制器之前模型的状态, $\bar{x}_k^+$ 表示控制器用接收到的 k 时刻的传感器数据更新之后的模型状态。

采用状态反馈控制律

$$u_k = K \bar{x}_k^+ = K(\Delta_k x_k + \bar{\Delta}_k \bar{x}_k^+). \quad (4)$$

并考虑到 $\Delta_k \in \{\delta_1, \dots, \delta_q\}$, 可知 Δ_k 取值的可能情况是有限的, 则系统的闭环方程可表示为

$$\begin{cases} z_{k+1} = \Psi_i z_k + \bar{H}_w w_k, \\ y_k = \bar{C} z_k. \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$z_k = \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \\ \bar{x}_k \end{bmatrix}, \quad \Psi_i = \begin{bmatrix} G + (H - DFE)K\delta_i & DFE & (H - DFE)K\bar{\delta}_i \\ K\delta_i & 0 & K\bar{\delta}_i \\ (G + HK)\delta_i & 0 & (G + HK)\bar{\delta}_i \end{bmatrix},$$

$$i = 1, 2, \dots, q, \quad \bar{H}_w = [H_w \ 0 \ 0], \quad \bar{C} = [C \ 0 \ 0].$$

这样, 多包传输网络控制系统可看作是由 q 个子系统组成的一个自主切换的线性离散切换系统, 且各个子系统作用的时间是不确定的.

3 NCS H_∞ 控制 (H_∞ control of NCS)

定义 1 对于系统(1)和模型(2), 若存在反馈控制器(4), 使得

1) 闭环系统(5)渐近稳定 ($w(t) \equiv 0$); 2) 给定正数 γ , 在零初始条件下, 满足 H_∞ 范数约束条件 $\|y\|_2 < \gamma \|w\|_2$. 其中, $\|\cdot\|_2$ 为 $L_2[0, \infty]$ 的标准范数, 则称反馈控制律(4)为系统(1)、(2)的 γ -次优 H_∞ 控制律, 系统的扰动衰减度为 γ , 进一步优化求解使 γ 最小的 H_∞ 控制律称为 γ -最优 H_∞ 控制律.

本文的目的是设计控制律(4), 使闭环系统(5)渐近稳定且使 H_∞ 性能指标最小.

引理 1 对于线性离散系统(5), 当不考虑外部扰动时 ($w(t) \equiv 0$), 如果存在一个共同的对称正定矩阵 P , 对于所有的子系统均有

$$\Psi_i^T P \Psi_i - P < 0, \quad i = 1, 2, \dots, q, \quad (6)$$

则系统是渐近稳定的.

引理 2^[7] 设 W, M, N, F 为具有适当维数的实矩阵, 其中 F 满足 $F^T F \leq I$, W 为对称阵, 那么

$$W + MFN + N^T F^T M^T < 0.$$

当且仅当存在常数 $\varepsilon > 0$, 使得

$$W + \varepsilon MM^T + \varepsilon^{-1} N^T N < 0.$$

定理 1 当不考虑外部扰动时 ($w(t) \equiv 0$), 若存在一个共同的对称正定矩阵 X , 矩阵 K 和一组标量 $\varepsilon_i > 0$, 使得下列矩阵不等式成立, 则闭环系

统(5)渐近稳定:

$$\begin{bmatrix} -X + \varepsilon_i \bar{D}^T \bar{D} & \bar{\Psi}_i X & 0 \\ X \bar{\Psi}_i^T & -X & X \bar{E}_i^T \\ 0 & \bar{E}_i & -\varepsilon_i I \end{bmatrix} < 0, \quad i = 1, 2, \dots, q, \quad (7)$$

其中:

$$\bar{\Psi}_i = \begin{bmatrix} G + HK\delta_i & DFE & HK\bar{\delta}_i \\ K\delta_i & 0 & K\bar{\delta}_i \\ (G + HK)\delta_i & 0 & (G + HK)\bar{\delta}_i \end{bmatrix},$$

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{E}_i = [EK\delta_i \quad E \quad EK\bar{\delta}_i].$$

证 由引理1, 当 $w(t) \equiv 0$ 时, 系统(5)渐近稳定的充分条件是存在对称正定矩阵 P , 使得式(6)成立. 由矩阵的Schur补性质, 式(6)等价于

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & \bar{\Psi}_i \\ \bar{\Psi}_i^T & -P \end{bmatrix} < 0. \quad (8)$$

而 Ψ_i 可以表示为

$$\Psi_i = \bar{\Psi}_i + \bar{D}FE_i. \quad (9)$$

将式(9)代入到式(8)中, 可得

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & \bar{\Psi}_i \\ \bar{\Psi}_i^T & -P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{D} \\ 0 \end{bmatrix} F [0 \quad \bar{E}_i] + \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{E}_i^T \end{bmatrix} F^T [\bar{D}^T \quad 0] < 0.$$

由引理2, 上式成立等价于存在标量 $\varepsilon_i > 0$, 使得下式成立:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & \bar{\Psi}_i \\ \bar{\Psi}_i^T & -P \end{bmatrix} + \varepsilon_i \begin{bmatrix} \bar{D} \\ 0 \end{bmatrix} [\bar{D}^T \quad 0] + \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{E}_i^T \end{bmatrix} \varepsilon_i^{-1} [0 \quad \bar{E}_i] < 0.$$

再由Schur补性质, 上式等价于

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} + \varepsilon_i \bar{D} \bar{D}^T & \bar{\Psi}_i & 0 \\ \bar{\Psi}_i^T & -P & \bar{E}_i^T \\ 0 & \bar{E}_i & -\varepsilon_i I \end{bmatrix} < 0.$$

对上式左乘、右乘 $\text{diag}\{I, P^{-1}, I\}$ 并令 $X = P^{-1}$ 即可得式(7). 证毕.

定理 2 给定常数 $\mu = \gamma^2 > 0$, 若存在对称正定矩阵 X , 矩阵 K 以及一组标量 $\varepsilon_i > 0$, 使得矩阵不等式(10)成立

$$\begin{bmatrix} -X + \varepsilon_i D D^T & \bar{\Psi}_i X & 0 & \bar{H}_w & 0 \\ X \bar{\Psi}_i^T & -X & X \bar{E}_i^T & 0 & X C^T \\ 0 & \bar{E}_i X & -\varepsilon_i I & 0 & 0 \\ \bar{H}_w^T & 0 & 0 & -\mu I & 0 \\ 0 & \bar{C} X & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (10)$$

$i = 1, 2, \dots, q$, 则闭环系统(5)渐近稳定, 且具有 H_∞ 性能指标 $\gamma = \sqrt{\mu}$.

证 由负定矩阵的性质, 若式(10)成立, 则式(7)必然成立, 根据定理1, 闭环系统(5)渐近稳定. 下面证明在零初始条件下, 闭环系统满足定义1中的条件2).

取Lyapunov函数 $V(z_k) = z_k^T P z_k$, 其中 P 为对称正定矩阵. 由式(5)可得

$$\begin{aligned} \Delta V(z_k) &= V(z_{k+1}) - V(z_k) = \\ & z_k^T (\Psi_i^T P \Psi_i - P) z_k + z_k^T \Psi_i^T P \bar{H}_w w_k + \\ & w_k^T \bar{H}_w^T P \Psi_i z_k + w_k^T \bar{H}_w^T P \bar{H}_w w_k. \end{aligned}$$

引入函数

$$\begin{aligned} J &= \sum_{k=0}^{\infty} (y_k^T y_k - \mu w_k^T w_k) = \\ & \sum_{k=0}^{\infty} (y_k^T y_k - \Delta V(z_k)) + \Delta V(z_0) - \Delta V(z_\infty), \end{aligned}$$

由零初始条件, $\Delta V(z_0) = 0$, 而 $\Delta V(z_\infty) \geq 0$, 因此

$$J \leq \sum_{k=0}^{\infty} (y_k^T y_k - \mu w_k^T w_k + \Delta V(z_k)).$$

而

$$\begin{aligned} y_k^T y_k - \Delta V(z_k) &= \\ & z_k^T (\Psi_i^T P \Psi_i - P + \bar{C}^T \bar{C}) z_k + z_k^T \Psi_i^T P \bar{H}_w w_k + \\ & w_k^T \bar{H}_w^T P \Psi_i z_k + w_k^T (\bar{H}_w^T P \bar{H}_w - \mu I) w_k = \\ & [z_k^T \quad w_k^T] \Pi_i \begin{bmatrix} z_k \\ w_k \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

其中

$$\Pi_i = \begin{bmatrix} \Psi_i^T P \Psi_i - P + \bar{C}^T \bar{C} & \Psi_i^T P \bar{H}_w \\ \bar{H}_w^T P \Psi_i & \bar{H}_w^T P \bar{H}_w - \mu I \end{bmatrix}.$$

若 $\Pi_i < 0$, 则 $y_k^T y_k - \Delta V(z_k) < 0$, 也即

$$J \leq \sum_{k=0}^{\infty} (y_k^T y_k - \Delta V(z_k)) < 0.$$

由此可得

$$\sum_{k=0}^{\infty} (y_k^T y_k - \mu w_k^T w_k + \Delta V(z_k)) < 0,$$

即

$$\|y\|_2^2 = \sum_{k=0}^{\infty} (y_k^T y_k) < \mu \sum_{k=0}^{\infty} (w_k^T w_k) = \mu \|w\|_2^2.$$

满足定义1的条件2). 而 $\Pi_i < 0$ 等价于

$$\begin{bmatrix} \Psi_i^T \\ \bar{H}_w^T \end{bmatrix} P [\Psi_i \quad \bar{H}_w] + \begin{bmatrix} -P + \bar{C}^T \bar{C} & 0 \\ 0 & -\mu I \end{bmatrix} < 0, \quad (11)$$

由Schur补性质, 式(11)等价于

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & \Psi_i & \bar{H}_w \\ \Psi_i^T & -P + \bar{C}^T \bar{C} & 0 \\ \bar{H}_w^T & 0 & -\mu I \end{bmatrix} < 0. \quad (12)$$

将式(9)代入到式(12), 经过与定理1类似的推导, 可得式(12)成立等价于式(10)成立. 证毕.

为使系统具有最优的扰动抑制能力, 需要寻求使式(10)成立的最小的 μ , 为此, 有以下推论:

推论 1 如果优化问题(13)有可行解, 则最优 H_∞ 控制律存在.

$$\begin{cases} \min_{X, K, \varepsilon_i} \mu, \\ \text{s.t. 式(10)}. \end{cases} \quad (13)$$

式(10)是关于 X , K 和 ε_i 的双线性矩阵不等式, 因此, 优化问题(13)是双线性矩阵不等式约束的优化问题, 可在MATLAB环境下用PENBMI软件求解^[8].

4 仿真算例(Simulation examples)

考虑网络控制系统的被控对象的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 2.5 \\ 1 & 1.5 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1.5 \\ 0 \end{bmatrix} (u(t) + w(t)), \\ y(t) = [1 \ 0] x(t). \end{cases}$$

设传感器节点的采样周期为 $T = 0.1$ s, 其数据分为两个数据包(即每个数据包只包含一个状态量), 且采用动态调度策略. 控制器节点和执行器节点为事件驱动, 网络诱导时延 $\tau_k < T$ 且是时变、不确定的. 要求设计一个控制律, 使得系统渐近稳定且满足最优的扰动抑制能力.

将系统按照采样周期离散化, 按照文献[6]方法进行计算, 可得广义系统的不确定离散时间模型如式(2)所示, 其中:

$$G = \begin{bmatrix} 1.0119 & 0.2331 \\ 0.0932 & 0.8720 \end{bmatrix}, \quad H = \bar{H}_w = \begin{bmatrix} 0.1625 \\ 0.1004 \end{bmatrix}.$$

取 $\alpha_1 = 0.1052$, $\alpha_2 = 0.0885$ 与特征值 $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = -2.5$ 相对应, 可得

$$D = \begin{bmatrix} 0.976 & -0.0626 \\ 0.0391 & 0.0626 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 1.9223 \\ 0.4041 \end{bmatrix},$$

$$F = \text{diag} \left\{ \frac{1.1052 - e^{0.1 - \tau_k}}{0.1052}, \frac{0.7788 - e^{-2.5(0.1 - \tau_k)}}{-0.2213} \right\}.$$

显然, 当 $0 \leq \tau_k \leq T$ 时, $F^T F \leq I$.

应用推论1, 在MATLAB环境下利用PENBMI软件包求解优化问题(13), 可以得到可行解如下:

$$X = \begin{bmatrix} 0.2713 & -0.2328 & -0.1289 & 0.2450 & -0.2407 \\ -0.2328 & 1.0936 & -0.8537 & -0.3213 & 0.9561 \\ -0.1289 & -0.8537 & 1.3447 & -0.0607 & -0.7411 \\ 0.2450 & -0.3123 & -0.0617 & 0.2612 & -0.3042 \\ -0.2407 & 0.9564 & -0.7411 & -0.3042 & 0.9133 \end{bmatrix},$$

$$K = [-1 \ 6935 \ -1 \ 2721], \varepsilon_1 = 0.8455,$$

$$\varepsilon_2 = 0.7303, \mu = 0.8104.$$

当系统的初始状态为 $x_0 = \bar{x}_0 = [4 \ 1]^T$, 外部干扰为

$$w(t) = \begin{cases} 1, & 3 \leq t \leq 5, \\ 0, & \text{其他}, \end{cases}$$

系统的状态响应曲线如图2所示. 由图可见, 系统是渐近稳定的, 且最优扰动衰减度为 $\gamma = 0.9022$.

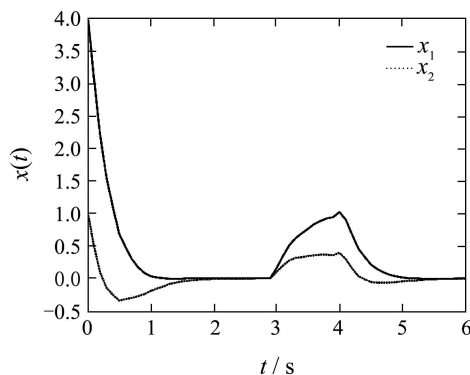


图2 闭环系统的状态响应曲线

Fig. 2 State response of closed-loop system

5 结论(Conclusion)

本文针对传感器时钟驱动、控制器和执行器事件驱动的多包传输网络控制系统, 考虑不确定但不大于一个采样周期的时延和有限能量外部扰动, 研究了最优 H_∞ 控制问题. 在控制器端用模型来估计系统的状态, 用接收到的传感器数据更新模型的状态, 然后用模型状态代替对象状态设计控制律, 建立了系统的闭环方程. 利用李亚普诺夫理论和矩阵不等式方法, 推导了最优 H_∞ 控制律存在的充分条件, 通

过求解矩阵不等式约束的优化问题得到最优 H_∞ 控制律. 仿真算例说明了本文方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] ZHANG W. *Stability analysis of networked control systems*[D]. Cleveland, Ohio: Case Western Reserve University, 2001.
- [2] 杨业, 王永骥. 一类多包传输网络控制系统的设计及稳定性分析[J]. 信息与控制, 2005, 34(2): 129 – 132.
(YANG Ye, WANG Yongji. Design and stability analysis of a class of networked control systems with multi packet transmission[J]. *Information and Control*, 2005, 34(2): 129 – 132.)
- [3] 刘振安, 葛愿. 基于多包传输的网络控制系统的稳定性分析[J]. 计算机仿真, 2006, 23(3): 92 – 94.
(LIU Zhen'an, GE Yuan. Stability analysis on multiple-packet transmission-based networked control systems[J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(3): 92 – 94.)
- [4] 雷必成, 王万良, 李祖欣. 基于LMI的多包传输网络控制系统的鲁棒性[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 509 – 513.
(LEI Bicheng, WANG Wanliang, LI Zuxin. Robustness of network control system with multi-packet transmission based on LMI[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2007, 36(4): 509 – 513.)
- [5] 郑萌, 张庆灵, 宋敏, 等. 短时延多包传输网络控制系统的稳定性分析[J]. 信息与控制, 2007, 36(3): 293 – 301.
(ZHENG Meng, ZHANG Qingling, SONG Min, et al. Stability analysis of multi-packet transmission networked control systems with short delay[J]. *Information and Control*, 2007, 36(3): 293 – 301.)
- [6] 谢成祥, 樊卫华, 胡维礼. 一类短时延网络控制系统的建模和控制方法[J]. 南京理工大学学报, 2009, 33(2): 156 – 160.
(XIE Chengxiang, FAN Weihua, HU Weili. Modeling and control method of a class of networked control systems with short time-delay[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2009, 33(2): 156 – 160.)
- [7] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
(YU Li. *Robust Control-Linear Matrix Inequalities Method*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)
- [8] HENRION D, LOFBERG J, KOCVARA M, et al. Solving polynomial static output feedback problems with PENBMI[C] // *Proceedings of the Joint 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference(CDC-ECC'05)*. Piscataway USA: IEEE Computer Society, 2005: 7581 – 7586.

作者简介:

谢成祥 (1970—), 男, 博士, 副教授, 目前主要研究方向是网络控制系统、预测控制等, E-mail: xiechx701008@163. com;

胡维礼 (1941—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为非线性控制、智能控制理论及应用等, E-mail: hwl1002@sina. com.