

时滞系统在高速网络下的最优扰动抑制

唐功友, 盖绍婷

(中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 研究在含有控制时滞与测量时滞的系统在高速通讯网络下最优扰动抑制问题. 首先建立在高速通讯网络下含有控制时滞与测量时滞系统的离散化数学模型, 利用模型转换将时滞系统转化为形式上的无时滞系统. 然后通过求解离散Riccati方程和Stein方程设计含有状态反馈、扰动前馈和控制记忆项的最优控制律, 前馈项和控制记忆项分别补偿了扰动和控制时滞对系统性能的影响. 通过构造降维扰动状态观测器, 设计了含扰动前馈、输出反馈及控制记忆项的动态控制律, 解决了前馈补偿器的物理不可实现问题. 仿真实例验证了所设计的最优控制律的有效性.

关键词: 时滞; 离散时间系统; 网络控制系统; 扰动; 最优控制; 观测器

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Optimal disturbance rejection for systems with time delays in high-speed networks

TANG Gong-you, GE Shao-ting

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100, China)

Abstract: The optimal disturbance rejection is considered for systems with delayed control and measurement in high-speed communication networks. Firstly, the discrete-time mathematical models for systems with delayed control and measurement are established. Based on a model transformation, we transform the system with delays to a formal system without delay. Then, the optimal control law with a state feedback, a disturbance feedforward and a control memory term is derived from a discrete Riccati equation and a Stein equation. The feedforward control term and the control memory term compensate for the effects of disturbances and the control delay, respectively. A dynamic control law with a disturbance feedforward, an output feedback and a control memory term is designed by constructing a reduced-order disturbance state observer, the observer makes the feedforward compensator physically realizable. Simulation results demonstrate the effectiveness of the optimal control law.

Key words: time delays; discrete-time systems; networked control systems; disturbances; optimal control; observer

1 引言(Introduction)

实际中常见的系统都是作用于外界持续扰动力下的. 从对扰动的了解程度分, 可以将扰动主要分为未知扰动特性的随机扰动和已知系统动态特性的确定性扰动两类问题. 对于确定性扰动系统, 有很鲜明的应用背景^[1~4], 例如过程控制系统^[5]中的阶跃扰动、斜坡扰动等问题的研究. 目前对系统外部持续扰动的抑制问题研究, 已取得若干有价值的研究成果, 提出了若干可行的解决方法^[6~8]等.

随着网络技术的迅猛发展, 网络控制系统^[9]日趋成为热门的研究课题. 目前实际中更广泛的控制系统是在高速通讯网络^[10]环境下运行的, 如现场总线系统^[11]、分布式控制系统(DCS)^[12]以及可编程逻辑

控制器(PLC)^[13]等都属于高速通讯网络.

严格地讲, 任何网络通讯和控制系统都存在时滞现象. 状态变量带有时滞系统的研究已经屡见不鲜^[14,15]. 事实上, 在实际的控制系统中, 更常见的时滞是控制时滞和测量时滞. 近年来, 含有控制时滞和测量时滞的系统受到学者们的广泛关注, 得到了许多有益的结果^[7,16], 例如, 文献[17]研究了含有控制时滞线性系统的最优扰动抑制问题.

本文研究受已知动态特性的外部扰动作用下, 控制输入和测量均含有时滞的系统在高速通讯网络下最优扰动抑制问题. 在建立系统的离散化数学模型的基础上, 利用模型转换将时滞系统转化为形式上无时滞系统. 进而设计含有状态反馈、扰动状态

前馈和控制记忆项的最优控制律. 通过构造扰动状态观测器, 解决前馈补偿器的物理不可实现问题.

2 系统建模(Modeling of systems)

本文研究的在高速通讯网络下受持续扰动的含有控制时滞和测量时滞的系统如图1所示, 其中: $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 为控制向量, $\bar{y}(t) \in \mathbb{R}^r$ 为输出向量, $\tau_1 > 0$ 和 $\tau_2 > 0$ 分别为执行机构时滞和控制器至执行机构的网络传输时滞, $\sigma_1 > 0$ 和 $\sigma_2 > 0$ 分别为传感器测量时滞和传感器至控制器的网络传输时滞, $y_m(t) = \bar{y}(t - \sigma_1)$ 和 $y(t) = y_m(t - \sigma_2) = \bar{y}(t - \sigma_1 - \sigma_2)$ 分别为传感器测量输出向量和反馈至控制器的系统输出向量. 记 $\tau = \tau_1 + \tau_2$, $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$, 在本文中分别称 τ 和 σ 为控制时滞和测量时滞. 在高速通讯网络下, 一般网络的信号传输时滞 τ_2 和 σ_2 是已知的. 对于多数系统而言执行机构时滞 τ_1 和传感器测量时滞 σ_1 也是已知的. 因此在本文中假设时滞 τ 和 σ 是已知的.

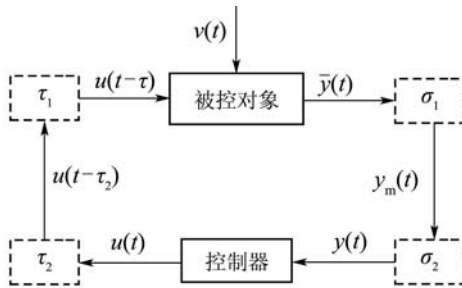


图1 系统结构图

Fig. 1 The structure diagram of the system

考虑如图1所示的在高速通讯网络下受扰线性系统, 本文提出系统的状态空间表达式如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau) + Dv(t), \\ y(t) = Cx(t - \sigma), \\ x(t) = \phi(t), \quad t \in [-\sigma, 0], \\ u(t) = 0, \quad t \in [-\tau, 0], \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 为状态向量, $v(t) \in \mathbb{R}^p$ 为外部扰动向量, A, B, C 和 D 为适当维数的常量矩阵, $\phi(t)$ 为初始状态向量. 假设 (A, B) 和 (C, A) 分别是完全能控和完全能观测的.

外部扰动 $v(t)$ 的动态特性由下列外系统 (Exosystem) 描述:

$$\begin{cases} \dot{w}(t) = Gw(t), \\ v(t) = Fw(t), \end{cases} \quad (2)$$

其中: $w(t) \in \mathbb{R}^q$ ($m \leq q$) 为外系统的状态向量,

G 和 F 为适当维数的已知常量矩阵, 初始条件 $w(0)$ 可以是未知的.

利用外系统(2)可以描述常见形式的持续扰动, 例如包括未知幅度的阶跃扰动和振荡频率已知但振幅和初相位未知的正弦扰动^[1,2,14]等. 为了适合于信号的网络传输和计算机控制, 需要对连续系统(1)离散化. 假设选取采样周期 T , 控制时滞和测量时滞分别表示为 $\tau = h_1T + d_1T$ 和 $\sigma = h_2T + d_2T$, 其中 $h_1, h_2 \in \mathbb{N}, 0 \leq d_i < 1$ ($i = 1, 2$). 笔者知道, 对于合理地选择采样周期情形下, $x(t), u(t)$ 及 $v(t)$ 在任意两个相邻采样时刻区间内变化很小, 因此作以下假设是合理的:

$$\begin{cases} x(t) = x(kT), \quad kT \leq t < (k+1)T, \\ u(t) = u(kT), \quad kT \leq t < (k+1)T, \\ v(t) = v(kT), \quad kT \leq t < (k+1)T. \end{cases} \quad (3)$$

由系统(1)的积分方程可以得到

$$\begin{aligned} x((k+1)T) = & e^{AT}x(kT) + \int_{kT}^{(k+1)T} e^{A((k+1)T-r)} \times \\ & [Bu(r - (h_1 + d_1)T) + Dv(r)]dr = \\ & e^{AT}x(kT) + \int_0^T e^{Ar}[Bu((k+1-h_1)T - \\ & (r + d_1T)) + Dv(kT)]dr = \\ & e^{AT}x(kT) + \int_0^{(1-d_1)T} e^{Ar}Bdr u((k-h_1)T + \\ & \int_{(1-d_1)T}^T e^{Ar}Bdr u((k-h_1-1)T + \\ & \int_0^T e^{Ar}Ddr v(kT), \end{aligned} \quad (4)$$

为了系统描述的方便, 记 $(\cdot)x(k) \triangleq (\cdot)x(kT)$. 从而得到系统(1)的离散化描述:

$$\begin{cases} x(k+1) = \bar{A}x(k) + B_1u(k-h_1) + \\ \quad B_2u(k-h_1-1) + \bar{D}v(k), \\ y(k) = Cx(k-h_2-1), \\ x(0) = x_0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} \bar{A} = e^{AT}, \quad B_1 = \int_0^{(1-d_1)T} e^{At}Bdt, \\ B_2 = \int_{(1-d_1)T}^T e^{At}Bdt, \quad \bar{D} = \int_0^T e^{At}Ddt. \end{cases} \quad (6)$$

同理, 外部扰动的动态特性的离散化方程可由下列外系统描述:

$$\begin{cases} w(k+1) = \bar{G}w(k), \\ v(k) = \bar{F}w(k), \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\bar{G} = e^{GT}$, $(\bar{F}, \bar{G})$ 是完全能观测的. 假设 $\bar{G}$ 的特

征值满足

$$|\mu_i(\bar{G})| \leq 1, i = 1, 2, \dots, r, \quad (8)$$

且 $\bar{G}$ 的最小多项式不存在在单位圆上的重根, 即外系统(7)是稳定的但可能不是渐近稳定的.

取变量代换:

$$\begin{cases} z(k) = x(k) + \sum_{i=k-h_1}^{k-1} \bar{A}^{k-i-1} \bar{B}u(i) + \\ \quad \bar{A}^{h_1} \bar{B}_2 u(k-h_1-1), \\ \bar{y}(k) = y(k) + \bar{C} \left(\sum_{i=k-h-1}^{k-1} \bar{A}^{k-i-1} \bar{B}u(i) + \right. \\ \quad \left. \bar{A}^{h+1} \times \bar{B}_2 u(k-h-2) + \right. \\ \quad \left. \sum_{i=k-h_2-1}^{k-1} \bar{A}^{k-l-1} \bar{D}v(l) \right), \end{cases} \quad (9)$$

则含有控制和传感器测量时滞系统(5)转化为形式上无时滞的系统:

$$\begin{cases} z(k+1) = \bar{A}z(k) + \bar{B}u(k) + \bar{D}v(k), \\ \bar{y}(k) = \bar{C}z(k), \\ z(0) = x(0), \\ y(k) = \bar{y}(k) - \bar{C} \left(\sum_{i=k-h-1}^{k-1} \bar{A}^{k-i-1} \bar{B}u(i) + \right. \\ \quad \left. \bar{A}^{h+1} \times \bar{B}_2 u(k-h-2) + \right. \\ \quad \left. \sum_{i=k-h_2-1}^{k-1} \bar{A}^{k-l-1} \bar{D}v(l) \right), \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{aligned} h &= h_1 + h_2, \quad \bar{B}_1 = \bar{A}^{-h_1} B_1, \\ \bar{B}_2 &= \bar{A}^{-h_1-1} B_2, \quad \bar{B} = \bar{B}_1 + \bar{B}_2, \\ \bar{C} &= C \bar{A}^{-h_2-1}. \end{aligned}$$

3 最优控制器的设计(Design of optimal controller)

对于连续操作的控制系统而言, 针对由外系统(7)描述的扰动的特性, 可以选取不同的二次型性能指标. 如果外系统(7)渐近稳定, 通常可以选择如下二次型性能指标:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [z^T(k) Q z(k) + u^T(k) R u(k)], \quad (11)$$

其中: $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为半正定矩阵, $R \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 为正定矩阵.

对于外系统(7)为稳定但非渐近稳定的情形, 如果选择性能指标(11), 由于在系统(10)中的扰动不能趋近于零, 所以无论如何选择控制律 $u(k)$, 它必为不

收敛的. 在此情况下, 可以选取平均二次型性能指标:

$$J = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N [z^T(k) Q z(k) + u^T(k) R u(k)]. \quad (12)$$

对于性能指标(11)和(12), 如果将 Q 分解为 $Q = \bar{C}^T K \bar{C}$, 其中 $K = K^T \in \mathbb{R}^{r \times r}$ 为正定矩阵, 三元组 $(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C})$ 是完全能控、能观测的.

系统(5)的最优扰动抑制问题, 就是寻找最优控制 $u^*(k)$, 使得二次型性能指标(11)或(12)取得极小值..

定理 1 考虑由(5)和(7)描述的控制系统, 关于二次型性能指标(11)或(12)的最优控制律为:

$$\begin{aligned} u^*(k) &= -S^{-1} \bar{B}^T [P \bar{A}(x(k) + \\ &\quad \sum_{i=k-h_1}^{k-1} \bar{A}^{k-i-1} \bar{B}u(i) + \\ &\quad \bar{A}^{h_1} \bar{B}_2 u(k-h_1-1)) + \\ &\quad (P \bar{D} \bar{F} + P_1 \bar{G}) w(k)], \end{aligned} \quad (13)$$

其中: $S = R + \bar{B}^T P \bar{B}$, P 为离散Riccati矩阵方程

$$\bar{A}^T (I - P \bar{B} S^{-1} \bar{B}^T) P \bar{A} + Q = P \quad (14)$$

的唯一正定解, P 是下列Stein矩阵方程

$$\begin{aligned} \bar{A}^T (I - P \bar{B} S^{-1} \bar{B}^T) P_1 \bar{G} - P_1 = \\ -\bar{A}^T (I - P \bar{B} S^{-1} \bar{B}^T) P \bar{D} \bar{F} \end{aligned} \quad (15)$$

的唯一解.

证 根据线性的最优控制理论可知, 系统(5), (7)关于二次型性能指标(11)或(12)的最优控制问题导致求解如下两点边值问题:

$$\begin{cases} z(k+1) = \\ \quad \bar{A}z(k) - \bar{B}R^{-1} \bar{B}^T \lambda(k+1) + \bar{D}v(k), \\ \lambda(k) = Qz(k) + \bar{A}^T \lambda(k+1), \\ z(0) = x(0), \lambda(\infty) = 0, \end{cases} \quad (16)$$

并且最优控制律为

$$u^* = -R^{-1} \bar{B}^T \lambda(k+1). \quad (17)$$

令

$$\lambda(k) = Pz(k) + P_1 w(k), \quad (18)$$

由式(16)和(18)得到

$$\begin{aligned} B^T \lambda(k+1) &= \\ \bar{B}^T P [\bar{A}z(k) - \bar{B}R^{-1} \bar{B}^T \lambda(k+1) + \\ \bar{D}v(k)] &+ \bar{B}^T P_1 \bar{G} w(k). \end{aligned} \quad (19)$$

整理得

$$\begin{aligned} R^{-1}\bar{B}^T\lambda(k+1) = \\ S^{-1}\bar{B}^T[P\bar{A}z(k) + (P\bar{D}\bar{F} + P_1\bar{G})w(k)]. \end{aligned} \quad (20)$$

将式(20)和(9)的第1式代入式(17), 得到最优控制律(13). 另一方面有

$$\begin{aligned} \lambda(k) = \\ [Q + \bar{A}^T(I - P\bar{B}S^{-1}\bar{B}^T)P\bar{A}]z(k) + \\ \bar{A}^T(I - P\bar{B}S^{-1}\bar{B}^T)(P\bar{D}\bar{F} + P_1\bar{G})w(k). \end{aligned} \quad (21)$$

比较式(18)和(21)的系数, 可以直接得到Riccati矩阵方程(14)和Stein 矩阵方程(15).

由 $(\bar{A}, \bar{B}, \bar{C})$ 的能控和能观测性可知, Riccati矩阵方程(14)存在唯一正定解 P . 又由最优控制理论知, $(I - \bar{B}S^{-1}\bar{B}^TP)\bar{A}$ 为渐近稳定的矩阵, 即

$$|\mu[\bar{A}^T(I - P\bar{B}S^{-1}\bar{B}^T)]| < 1, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (22)$$

再由条件(8), 得到

$$\begin{cases} |\mu_i[\bar{A}^T(I - P\bar{B}S^{-1}\bar{B}^T)]\mu_j(\bar{G})| < 1, \\ i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, r. \end{cases} \quad (23)$$

由上式可知, Stein矩阵方程(15)存在唯一解 P_1 . 通过解得矩阵 P 和 P_1 , 代入式(13)可以唯一确定.

证毕.

4 控制器的物理可实现设计(Design of physically realizable controllers)

注意到最优控制律(13)中含有描述外部扰动的外系统(7)的状态 $w(k)$. $w(k)$ 一般不是物理量, 所以最优控制律(13)是物理不可实现的. 又一般而言, 除了输出向量 $y(k)$ 可以直接测量外, 通常系统(5)的状态向量 $x(k)$ 也不是全部可以测量的. 为了得到物理可实现的控制律, 通过构造外系统(7)和系统(5)的降维状态观测器结合最优控制律(13)设计一种接近于最优控制的动态控制律.

定义增广状态

$$\zeta(k) = [z^T(k), w^T(k)]^T,$$

由式(5)和(7)得到以下增广系统:

$$\begin{aligned} \zeta(k+1) &= \tilde{A}\zeta(k) + \tilde{B}u(k), \\ \eta(k) &= \tilde{C}\zeta(k), \end{aligned} \quad (24)$$

其中

$$\eta(k) = [\bar{y}^T(k), v^T(k)]^T$$

及

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{D}\bar{F} \\ 0 & \bar{G} \end{bmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} \bar{B} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{C} = \begin{bmatrix} \bar{C} & 0 \\ 0 & \bar{F} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

由 $(\tilde{C}, \tilde{A})$ 和 $(\tilde{B}, \tilde{G})$ 的能观测性, 容易验证 $(\tilde{C}, \tilde{A})$ 是完全能观测的.

选择矩阵 $H \in \mathbb{R}^{(n+p-m_1-q) \times (m_1+q)}$, 使得 $\Gamma = [\tilde{C}^T H^T]^T$ 是非奇异的. 注意到 $\Pi = \Gamma^{-1} = [\Pi_1; \Pi_2]$, 则 $\tilde{C}\Gamma^{-1} = [I_{m_1+q} \ 0]$. 由非奇异变换 $\bar{\zeta}(k) = \Gamma\zeta(k)$, 得到

$$\begin{cases} \bar{\zeta}(k+1) = \begin{bmatrix} \bar{\zeta}_1(k+1) \\ \bar{\zeta}_2(k+1) \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} \tilde{C}\tilde{A}\Pi_1 & \tilde{C}\tilde{A}\Pi_2 \\ H\tilde{A}\Pi_1 & H\tilde{A}\Pi_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{\zeta}_1(k) \\ \bar{\zeta}_2(k) \end{bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} \tilde{C}\tilde{B} \\ H\tilde{B} \end{bmatrix} u(k), \\ \eta(k) = \bar{\zeta}_1(k), \end{cases} \quad (26)$$

其中: $\tilde{C}\tilde{B}, H\tilde{B}, \tilde{C}\tilde{A}\Pi_i, H\tilde{A}\Pi_i$ ($i = 1, 2$)是适当维数的常量矩阵. 由于 $(\tilde{C}, \tilde{A})$ 是完全能观测的, 易知 $(\tilde{C}\tilde{A}\Pi_2, H\tilde{A}\Pi_2)$ 也是完全能观测的. 因此, 可以构造以下形式的降维观测器:

$$\begin{cases} \psi(k+1) = (H - L\tilde{C})[\tilde{A}\Pi_2\psi(k) + \tilde{A}(\Pi_2L + \\ \Pi_1)\eta(k) + \tilde{B}u(k)], \\ \hat{\zeta}(k) = \Pi_2\psi(k) + (\Pi_1 + \Pi_2L)\eta(k), \end{cases} \quad (27)$$

其中: $\hat{\zeta}(k)$ 是 $\zeta(k)$ 的估计状态, $\psi(k)$ 是观测器状态, L 是待选的观测器增益矩阵. 可以根据对观测器(27)渐近稳定的要求选择增益矩阵 L . 在最优控制(13)中, 状态向量 $w(k)$ 和 $x(k)$ 分别用其观测值取代, 并利用观测器(27)整理后, 可以得到如下含扰动前馈、输出反馈及控制记忆的动态控制律:

$$\begin{cases} \psi(k+1) = (H - L\tilde{C})[\tilde{A}\Pi_2\psi(k) + \tilde{A}(\Pi_2L + \\ \Pi_1)\eta(k) + \tilde{B}u(k)], \\ u(k) = -S^{-1}\bar{B}^T[P(P\bar{D}\bar{F} + P_1\bar{G}) \times \\ [\Pi_2\psi(k) + (\Pi_1 + \Pi_2L)\eta(k)], \end{cases} \quad (28)$$

其中:

$$\begin{aligned} S &= R + \bar{B}^TP\bar{B}, \quad \eta(k) = [r^T(k), v^T(k)]^T, \\ r(k) &= y(k) + \bar{C} \left(\sum_{i=k-h-1}^{k-1} \bar{A}^{k-i-1} \bar{B}u(i) + \right. \\ &\quad \left. \bar{A}^{h+1} \times \bar{B}_2u(k-h-2) + \right. \\ &\quad \left. \sum_{l=k-h_2-1}^{k-1} \bar{A}^{k-l-1} \bar{D}v(l) \right). \end{aligned} \quad (29)$$

5 仿真示例(Simulation examples)

考虑由(1)和(2)描述的受扰线性时滞系统, 其中

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -2 & -2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \\ C = [1 \ 0 \ 0], \\ D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, x(0) = [0 \ 0 \ 0]^T, \end{cases} \quad (30)$$

取 $T = 0.05$, 将其离散化得到由系统(5)描述的持续扰动的时滞线性系统:

$$\begin{cases} \bar{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0.05 & 0.0012 \\ 0.0012 & 0.9976 & 0.0475 \\ 0.0475 & -0.0939 & 0.9025 \end{bmatrix}, \\ C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T, B_1 = \begin{bmatrix} 4.4329 \times 10^{-6} \\ 4.4107 \times 10^{-6} \\ 0.0291 \end{bmatrix}, \\ B_2 = \begin{bmatrix} 1.5885 \times 10^{-5} \\ 7.6779 \times 10^{-4} \\ 0.0184 \end{bmatrix}, \\ \bar{D} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0 \\ 0 & 0.0012 \\ 0.0012 & 0.0475 \end{bmatrix}, x(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (31)$$

最优控制的性能指标由式(12)描述, 其中:

$$K = I, R = 0.0001,$$

即

$$Q = \begin{bmatrix} 0.9971 & -0.1967 & 0.0228 \\ -0.1967 & 0.0388 & -0.0045 \\ 0.0228 & -0.0045 & 0.0005 \end{bmatrix}. \quad (32)$$

系统的扰动由外系统(7)描述, 其中:

$$\begin{cases} \bar{G} = \begin{bmatrix} 0.9987 & 0.05 & -0.05 \\ -0.0499 & 0.9938 & 0.0001 \\ 0.0062 & -0.0497 & 1 \end{bmatrix}, \\ \bar{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, w(0) = [1 \ 0 \ 0]^T, \end{cases} \quad (33)$$

分别取 $\tau = 0$, $\tau = 1.5$ 和 $\tau = 3$, 即 $h_1 = 0$, $h_2 = 30$ 和 $h_3 = 60$ 时, 系统的状态变量 $x_1(k)$, $x_2(k)$, $x_3(k)$ 及最优控制变量 $u^*(k)$ 的仿真曲线如图2~5所示。

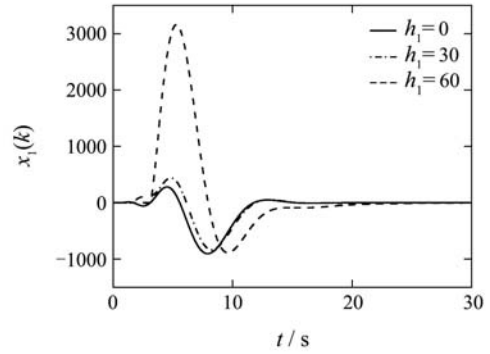


图2 状态变量 $x_1(k)$ 的仿真曲线

Fig. 2 Simulation curves of state $x_1(k)$

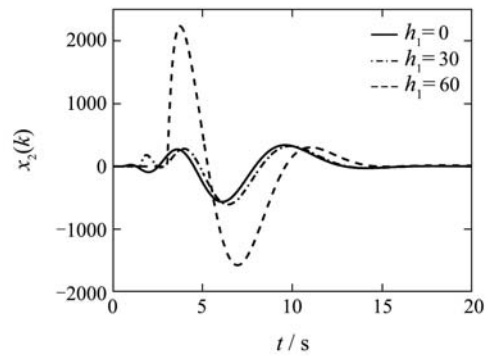


图3 状态变量 $x_2(k)$ 的仿真曲线

Fig. 3 Simulation curves of state $x_2(k)$

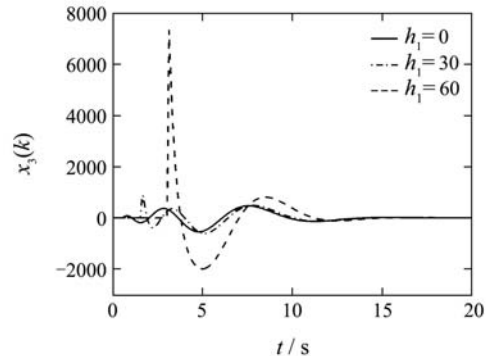


图4 状态变量 $x_3(k)$ 的仿真曲线

Fig. 4 Simulation curves of state $x_3(k)$

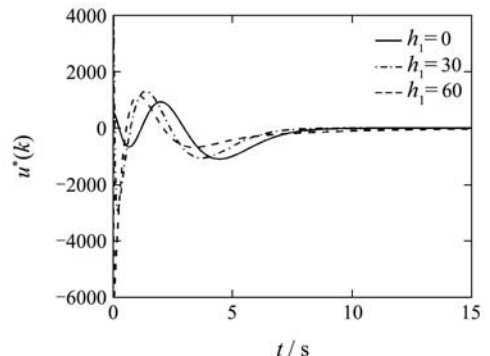


图5 最优控制律 $u^*(k)$ 的仿真曲线

Fig. 5 Simulation curves of optimal control $u^*(k)$

由以上示例的仿真结果可以看出,随着时滞的增大,控制质量逐渐变差,表现在图2~4中,时滞越大,相同时间点上对应的状态变量的幅值越大.但对于不同的时滞,利用本文提出的最优扰动抑制控制律的设计方法都可以得到相对满意的结果,即都能使状态变量趋于稳定.所以本文提出的关于控制和测量含有时滞的离散时间系统的最优扰动抑制控制律的设计方法在高速通讯网络环境下是行之有效的,能够减弱外界确定扰动的影响,对于外界确定扰动具有良好的抑制性,同时对控制时滞进行了有效的补偿,而且容易实现,便于计算和实际应用.

6 结论(Conclusion)

本文研究了受确定动态特性的外部持续扰动作用下,含有控制时滞和测量时滞的系统在高速通讯网络下最优扰动抑制问题.在建立系统的离散化数学模型的基础上,利用模型转换将时滞系统转化为形式上的无时滞系统.进而设计含有状态反馈、扰动状态前馈和控制记忆项的最优控制律.通过设计降维扰动观测器解决前馈控制的物理不可实现问题.

参考文献(References):

- [1] MA H, TANG G Y, ZHAO Y D. Feedforward and feedback optimal control for offshore structures subjected to irregular wave forces[J]. *Ocean Engineering*, 2006, 33(8/9): 1105 – 1117.
- [2] WANG W, TANG G Y. Feedback and feedforward optimal control for offshore jacket platforms[J]. *China Ocean Engineering*, 2004, 18(4): 515 – 526.
- [3] ORCCOTOMA J A, PARIS J, PERRIER M. Paper machine controllability: effect of disturbances on basis weight and first-pass retention[J]. *Journal of Process Control*, 2001, 11(4): 401 – 408.
- [4] JOSE J, TAYLOR R J, DE CALLAFON R A, et al. Characterization of lateral tape motion and disturbances in the servo position error signal of a linear tape drive[J]. *Tribology International*, 2005, 38(6/7): 625 – 632.
- [5] RAMOS-HERNANDEZ D N, FLEMING P J, BASS J M. A novel object-oriented environment for distributed process control systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(2): 213 – 230.
- [6] MARINO R, SANTOSUOSSO G L, TOMEI P. Robust adaptive compensation of biased sinusoidal disturbances with unknown frequency[J]. *Automatica*, 2003, 39(10): 1755 – 1761.
- [7] JAZAYERI-RAD H. Minimizing the effects of unmeasured disturbances in an open-loop unstable chemical plant containing measurement dead times[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2008, 86(2): 153 – 163.
- [8] TANG G Y. Feedforward and feedback optimal control for linear systems with sinusoidal disturbances[J]. *High Technology Letters*, 2001, 7(4): 16 – 19.
- [9] YUE D, HAN Q L, LAM J. Network-based robust H_∞ control of systems with uncertainty[J]. *Automatica*, 2005, 41(6): 999 – 1007.
- [10] ALTMAN E, AVRACHENKOV K, BARAKAT C, et al. Analysis of MIMD congestion control algorithm for high speed networks[J]. *Computer Networks*, 2005, 48(6): 972 – 989.
- [11] BELLATO M, ISOCRATE R, MENG G, et al. Remoting field bus control by means of a PCI express-based optical serial link[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2007, 570(3): 518 – 524.
- [12] HENRIQUEZ H R. Approximate controllability of linear distributed control systems[J]. *Applied Mathematics Letters*, 2008, 21(10): 1041 – 1045.
- [13] FLORDAL H, FABIAN M, AKESSON K, et al. Automatic model generation and PLC-code implementation for interlocking policies in industrial robot cells[J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(11): 1416 – 1426.
- [14] JIANG W, SONG W Z. Controllability of singular systems with control delay[J]. *Automatica*, 2001, 37(11): 1873 – 1877.
- [15] TANG G Y, LU S S, DONG R. Optimal sliding mode control for linear time-delay systems with sinusoidal disturbances[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 304 (1/2): 263 – 271.
- [16] UCHIDA K, FUJITA M, IKEDA K. Another look at finite horizon H_∞ control problems for systems with input delays[J]. *Automatica*, 2004, 40(6): 977 – 984.
- [17] 唐功友, 雷靖, 孙亮. 控制时滞系统基于观测器的最优扰动抑制[J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(2): 209 – 214.
(TANG Gongyou, LEI Jing, SUN Liang. Observer-based optimal disturbance-rejection for linear systems with time-delay in control action[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(2): 209 – 214.)

作者简介:

唐功友 (1953—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为时滞系统、非线性系统及网络控制的分析与综合、故障诊断与容错控制等, E-mail: gtang@ouc.edu.cn;

盖绍婷 (1983—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为时滞系统、网络控制的分析与综合等, E-mail: shaotingge@gmail.com.