

不确定时延网络控制系统的建模与稳定性研究

郭晓军, 袁 阳

(海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘 要: 针对网络控制系统(NCS)中存在的确定性长时延问题, 讨论和分析了系统的建模和稳定性问题。假设网络控制系统的传感器采用时间驱动, 执行器与控制器采用事件驱动, 传感器的数据采用单包传输, 网络控制系统可建模为一类线性离散时延系统。根据 Lyapunov 稳定性理论, 给出了闭环系统渐近稳定的充分条件, 并基于相应的线性矩阵不等式(LMI)可行解, 求解出状态反馈控制律。仿真结果说明了此方法的有效性。

关键词: NCS; 不确定时延; Lyapunov 稳定性; LMI

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)05-0065-05

Research on Modeling and Stability for Networked Control Systems with Uncertain Time Delay

Guo Xiaojun, Yuan Yang

(College of Navy Aviation Engineering, Yantai 264001 China)

Abstract: Considering the uncertain long time-delay of networked control systems(NCS), the problems of modeling and stability of NCS are discussed and analyzed. If the sensor node of NCS is time-driven, the actuator and the controller are event-driven, the sampled data are lumped together into a single data packet and the NCS with uncertain long time delay is modeled as a discrete linear system with uncertain time-delay. Then based on Lyapunov stability theory, sufficient conditions of asymptotic stability of closed-loop systems are derived, and the state feedback controller is obtained based on the feasible solution of the linear matrix inequalities(LMI). The simulation results verified that this method is valid for the uncertain long time-delay problem of NCS.

Key words: NCS; uncertain long time delay; Lyapunov stability; LMI

0 引言

随着 Internet 的飞速发展, 网络环境下的新型管理信息系统及控制系统不仅可以应用于复杂的工业控制领域, 而且在兵器系统、机器人工业、航空及航天领域也极具潜力^[1-3]。

由于 NCS 中的各种信息(包括参考输入、对象输出、控制器输出)通过网络在控制系统的各部件(传感器、控制器和执行器)之间传输、交换, 所以必然会引起网络诱导时延, 而且该时延随着网络负载的变化而变化, 是不确定的, 控制系统的分析和设计必须

考虑到传输时延的影响^[4,5]。当信号的传输时延大于系统的采样周期时, 称此为长时延 NCS。目前, 对于时延上界小于采样周期的短时延 NCS 的研究相对较多, 而长时延 NCS 的研究并不很多。文献[6, 7]通过设置缓存, 将时变时延转化为固定时延, 采用预测控制的方法设计控制器。该方法存在着局限性, 应用价值不高。文献[8]假设时延为符合某种统计规律的随机量, 在已知时延统计规律的情况下, 借助随机控制理论, 设计使系统稳定的控制器。这种假设符合网络数据流比较小的情况。当数据流比较大时, 假设不尽合理, 且

收稿日期: 2008-08-02

作者简介: 郭晓军(1962-), 男, 山东烟台人, 海军航空工程学院副教授, 主要从事智能控制, 复杂系统方面的教学与研究;
袁 阳(1984-), 男, 江西南昌人, 海军航空工程学院硕士研究生, 主要研究方向为网络控制, 智能控制。

时延的概率分布未必可知。文献[9]针对短时延 NCS, 给出了广义被控对象线性离散模型, 其模型并不要求知道时延的统计规律。相对于文献[6-8], 文献[9]中的条件更容易满足。

本文在上述文献的基础上, 针对 NCS 的时变、长时延的特点, 给出了广义被控对象的离散模型, 并将其转化为具有不确定性的线性离散系统。该模型不要求知道时延的统计规律, 使网络的时延特点更具有广泛性, 再结合 Lyapunov 函数方法, 给出了保证闭环系统渐近稳定的充分条件, 并基于相应的线性矩阵不等式方法, 可以求解出保证系统稳定的状态反馈控制律。

1 长时延 NCS 模型建立及稳定性分析

典型的 NCS 结构如图 1 所示。

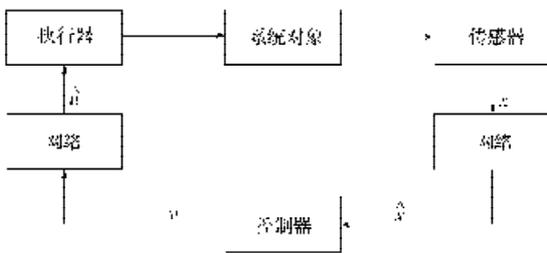


图 1 网络控制系统结构

Fig. 1 The system structure of NCS

图 1 中 $x(t) \in R^n$, $\hat{x}(t) \in R^n$ 分别表示被控对象的状态及其在控制器接收端的镜像; $u \in R^m$, $\hat{u} \in R^m$ 分别表示控制量及其在执行器接收端的镜像。由于网络的引入, 信号的传输存在时延, 分别采用 τ_k^{sc} , τ_k^{ca} 来表示, 含义为第 k 个采样时刻传感器到控制器的传输时延和控制器到执行器的传输时延。实际控制系统中, 还需要考虑计算时延, 一般可将其归并到上述 2 个时延中, 这对整个系统的分析是等价的。

针对图 1 所示的网络控制系统, 不妨作如下假设。

假设 1 传感器节点为时间驱动, 以固定的周期 T ($T > 0$) 对被控对象采样, 并将数据 (被控对象的状态量) 存放在单个数据包中进行传输。

假设 2 控制器节点为事件驱动, 采样数据到达时刻计算控制量并输出; 执行器节点也为事件驱动,

控制量到达时刻执行相应的动作。

假设 3 网络信息传输存在不确定时延, 控制回路总的时延 $\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^{ca}$, 且 $0 \leq \tau_k \leq T$ 。

假设 4 网络传输过程中无数据包丢失。

设线性时不变的被控对象状态方程如下所示:

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

其中: $x(t) \in R^n$ 为对象状态;

$u(t) \in R^m$ 为对象输入;

$w(t) \in R^p$ 为外界扰动输入, 且 $w(t) \in L_2[0, \infty)$ 为平方可积的信号;

$y(t) \in R^q$ 为对象输出;

A, B, C, B_w 为适当维数的常系数矩阵。

因此, 网络控制系统的广义被控对象离散模型为

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_{d0}(\tau_k) u_k + B_{d1}(\tau_k) u_{k-1} + B_{dw} w_k, \quad (2)$$

其中: $A_d = e^{AT}$;

$$B_{d0}(\tau_k) = \int_0^{\tau_k} e^{-As} B ds;$$

$$B_{d1}(\tau_k) = \int_{T-\tau_k}^T e^{-As} B ds;$$

$$B_{dw} = \int_0^T e^{-As} B_w ds.$$

由假设 3, 时延 τ_k 是时变不确定的, 因此 $B_{d0}(\tau_k)$, $B_{d1}(\tau_k)$ 也是时变的, 网络控制系统的广义被控对象 (2) 是一个具有时变参数的线性离散系统。

目前, 对于时变系统的研究多数集中于慢时变系统, 一般采用参数冻结法将时变系统等效为一系列时不变系统, 然后借助时不变系统的相关结果进行系统分析和综合, 而快时变系统的研究则比较少。式 (2) 的参数时变特性与网络诱导时延直接相关, 不一定是慢时变的。本文主要对上述时变模型进行转换, 以便进行进一步的工作。

根据矩阵理论知识可知, 若 A 含有 n 个互异的特征值, 则其可化成对角阵, 否则可化为约当标准型。若 A 可对角化, 则采用 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 表示矩阵 A 特征值, $\Lambda = [\Lambda_1, \dots, \Lambda_n]$ 表示矩阵 A 的特征向量所构成的矩阵。不失一般性, 设 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 均不为 0, 因此

$$\begin{aligned} B_{dc} &= \int_0^{T-\tau_k} e^{-At} B dt = A \text{diag} \left(\int_0^{T-\tau_k} e^{\lambda_1 t} dt, \int_0^{T-\tau_k} e^{\lambda_2 t} dt, \dots, \int_0^{T-\tau_k} e^{\lambda_n t} dt \right) \Lambda^{-1} B = A \text{diag} \left(-\frac{1}{\lambda_1}, -\frac{1}{\lambda_2}, \dots, -\frac{1}{\lambda_n} \right) \Lambda^{-1} B + \\ &A \text{diag} \left(\frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 (T-\tau_k)}, \frac{1}{\lambda_2} e^{\lambda_2 (T-\tau_k)}, \dots, \frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n (T-\tau_k)} \right) \Lambda^{-1} B = A \text{diag} \left(-\frac{1}{\lambda_1}, -\frac{1}{\lambda_2}, \dots, -\frac{1}{\lambda_n} \right) \Lambda^{-1} B + \\ &A \text{diag} \left(-\frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 \tau_k}, -\frac{1}{\lambda_2} e^{\lambda_2 \tau_k}, \dots, -\frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n \tau_k} \right) \cdot \text{diag} \left(\frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 (T-\tau_k-\tau_k)}, \frac{1}{\lambda_2} e^{\lambda_2 (T-\tau_k-\tau_k)}, \dots, \frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n (T-\tau_k-\tau_k)} \right) \Lambda^{-1} B, \\ \text{令 } B_{dc} &= A \text{diag} \left(-\frac{1}{\lambda_1}, \dots, -\frac{1}{\lambda_n} \right) \Lambda^{-1} B, \quad (3) \quad D = A \text{diag} \left(-\frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 \tau_k}, \dots, -\frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n \tau_k} \right), \quad (4) \end{aligned}$$

$$F(\tau_k) = \text{diag} \left(\frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1(\tau-\tau_k-\alpha_1)}, \dots, \frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n(\tau-\tau_k-\alpha_n)} \right), \quad (5)$$

$$E = A^{-1}B, \quad (6)$$

则 $B_{\text{eff}}(\tau_k) = B_{\text{eff}} - DF(\tau_k)E$ 。其中关于 α_i ($i=1, \dots, n$) 的选取现在没有相关的文献支持, 可以采用最简单的办法:

当 $\lambda_i > 0$ 时, 则 $\alpha_i \approx T$; 当 $\lambda_i < 0$ 时, 则 $\alpha_i \approx 0$ 。

同理, $B_{\text{eff}}(\tau_k) = B_{\text{eff}} + DF(\tau_k)E$, 其中

$$B_{\text{eff}} = A \text{diag} \left(\frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 T}, \dots, \frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n T} \right) A^{-1}B_0$$

当 A 具有 0 特征值和重特征值时, 不失一般性, 设具有 1 个 0 特征值, 以及 1 个 r 重特征值 λ^* , 其余均为非 0 互异特征值, 即 $A = A \text{diag}(0, J_1, J_2) A^{-1}$, 其中 J_1 是由 A 的互异特征值 $\lambda_2, \dots, \lambda_{n-r}$ 组成的对角块, $J_2 \in \mathbb{R}^{r \times r}$ 是与 λ^* 对应的约当块。通过计算可得

$$B_{\text{eff}} = A \text{diag} \left(T, \tilde{J}_1, \tilde{J}_2 \right) A^{-1}B, \quad \text{其中:}$$

$$\tilde{J}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda^2} e^{\lambda^*(T-\tau_k)} & & & & \\ \frac{1}{\lambda^{*2}} (\lambda^*(T-\tau_k)-1) e^{\lambda^*(T-\tau_k)} & & & & \\ \vdots & & & & \\ \frac{1}{\lambda^{*r}} \sum_{j=1}^r (-1)^{j-1} \frac{[\lambda^*(T-\tau_k)]^{r-j}}{(r-j)!} e^{\lambda^*(T-\tau_k)} & \dots & \frac{1}{\lambda^{*2}} (\lambda^*(T-\tau_k)-1) e^{\lambda^*(T-\tau_k)} & \frac{1}{\lambda^*} e^{\lambda^*(T-\tau_k)} \end{bmatrix}, \quad \lambda^* \neq 0;$$

$$\tilde{J}_2 = \begin{bmatrix} -\tau_k & & & & \\ \frac{(T-\tau_k)^2}{2} & \ddots & & & \\ \vdots & \ddots & \ddots & & \\ \frac{(T-\tau_k)^r}{r!} & \dots & \frac{(T-\tau_k)^2}{2} & -\tau_k \end{bmatrix}, \quad \lambda^* = 0.$$

$$F(\tau_k) = \text{diag} \left(-\frac{\tau_k}{\alpha_1}, e^{\lambda_2(\tau-\tau_k-\alpha_2)}, \dots, e^{\lambda_n(\tau-\tau_k-\alpha_n)}, P_2^{-1} \tilde{J}_2' \right).$$

同理可以计算出 $B_{\text{eff}} = A \text{diag}(0, \tilde{J}_1, \tilde{J}_2) A^{-1}B$ 。

通过上述分析可知, 无论特征方程 A 在什么条件下, 采用状态反馈控制律 $u_k = K_{x_k}$, 系统的状态方程都可以采用式 (7) 表示。

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_d x_k - (B_{\text{eff}} + DF(\tau_k)E) u_k - (B_{\text{eff}} - DF(\tau_k)E) u_{k-1} + B_{\text{dw}} w_k; \\ y_k = C x_k. \end{cases} \quad (7)$$

其中 $A_d, B_{\text{dw}}, B_{\text{d0}}, B_{\text{d1}}, D, E$ 为定常矩阵, $B_{\text{d0}}, B_{\text{d1}}, D, E, F(\tau_k)$ 为不确定矩阵, 满足 $F^T(\tau_k)F(\tau_k) = I$ 。

$$\tilde{J}_1 = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\lambda_2}\right) & & & \\ & \ddots & & \\ & & & \left(\frac{1}{\lambda_{n-r}}\right) \end{bmatrix};$$

$$\tilde{J}_2 = \begin{cases} \begin{bmatrix} -\frac{1}{\lambda^*} & & & \\ 1 & & & \\ \lambda^{*2} & & & \\ \vdots & & & \end{bmatrix}, \quad \lambda^* \neq 0; \\ \text{diag}(T, \dots, T), \quad \lambda^* = 0, \end{cases}$$

$$D_c = A \text{diag} \left(\frac{1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 \alpha_1}, \frac{1}{\lambda_2} e^{\lambda_2 \alpha_2}, \dots, \frac{1}{\lambda_n} e^{\lambda_n \alpha_n} \right).$$

因此, $\alpha_1 > \tau_k$, 选择方法就是 $\alpha_i > T, \alpha_i (i=2, \dots, n-r)$ 的选择使得 $e^{\lambda_i(\tau-\tau_k-\alpha_i)} < 1$ (与原来的选择方法相同), $P_2 \in \mathbb{R}^{r \times r}$ 是对角可逆矩阵, 且使得 $\|P_2 \tilde{J}_2'\| < 1$,

2 不确定时延网络控制系统的稳定性

首先, 以下简化 $F(\tau_k)$ 为 F , 为分析方便引入以下引理及定义。

引理 1 (Schur 补) 给定常数矩阵 A, P, Q , 其中 $Q = Q^T, P = P^T > 0$, 则 $A^T P A + Q < 0$ 成立, 当且仅当

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & A \\ A^T & Q \end{bmatrix} < 0 \text{ 或者 } \begin{bmatrix} Q & A^T \\ A & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0.$$

引理 2 设 W, M, N, F 为具有适当维数的实矩阵, 其中 $F^T(k)F(k) \leq I, W$ 为对称矩阵, 那么 $W + N^T F^T(k) M^T + M F(k) N < 0$ 。当且仅当存在常数 $\varepsilon > 0$, 使得 $W + \varepsilon^{-1} N^T N + \varepsilon M M^T < 0$ 。

通过不断地引用上述的2个引理逐次分析,可以得到定理1。

定理1 假设系统:

$$x_{k+1} = A_d x_k + (B_{d0} + DF(\tau_k)E) u_k + (B_{d1} - DF(\tau_k)E) u_{k-1}, \quad (8)$$

描述的对象状态均可测,采用控制律: $u_k = Kx_k$, 若存在对称正定阵 P, Q 和标量 $\varepsilon > 0$, 使得矩阵不等式成立, 且同时满足

$$\begin{bmatrix} \varepsilon DD^T - P^{-1} & A_d + B_{d0}K & B_{d1}K & 0 \\ (A_d + B_{d0}K)^T & -P + Q & 0 & (EK)^T \\ (B_{d1}K)^T & 0 & -Q & (-EK)^T \\ 0 & EK & -EK & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta V(k) = & x_k^T (A_d + B_{d0}K + DF EK)^T P (A_d + B_{d0}K + DF EK) x_k - 2x_k^T (A_d + B_{d0}K + DF EK)^T P (B_{d1}K - \\ & DF EK) x_{k-1} + x_{k-1}^T (B_{d1}K - DF EK)^T P (B_{d1}K - DF EK) x_{k-1} + x_k^T Q x_k - x_k^T P x_k - x_{k-1}^T Q x_{k-1} \triangleq \\ & [x_k^T, x_{k-1}^T] \Theta \begin{bmatrix} x_k \\ x_{k-1} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

$$\text{其中: } \Theta = \begin{bmatrix} \bar{G}^T P \bar{G} - P + Q & \bar{G}^T P (B_{d1}K - DF EK) \\ (B_{d1}K - DF EK)^T P & (B_{d1}K - DF EK)^T P (B_{d1}K - DF EK) - Q \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$\bar{G} = A_d - B_{d0}K + DF EK.$$

由式(10), $\Theta < 0$, 即

若 $\Theta < 0$, 即 $\Delta V(k) < 0$, 则闭环系统是渐近稳定的。

$$\begin{bmatrix} \bar{G}^T P \bar{G} - P - Q & \bar{G}^T P (B_{d1}K - DF EK) \\ (B_{d1}K - DF EK)^T P \bar{G} & (B_{d1}K - DF EK)^T P (B_{d1}K - DF EK) - Q \end{bmatrix} < 0$$

$$\text{等价于} \begin{bmatrix} P^{-1} Q & 0 \\ 0 & -Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (A_d + B_{d0}K + DF EK)^T \\ (B_{d1}K - DF EK)^T \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} (A_d + B_{d0}K - DF EK) & (B_{d1}K - DF EK) \end{bmatrix} < 0.$$

由 Schur 补引理, 上式亦可写为:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & A_d + B_{d0}K & B_{d1}K \\ (A_d + B_{d0}K)^T & -P + Q & 0 \\ (B_{d1}K)^T & 0 & -Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F [0 \quad EK \quad -EK] + [0 \quad EK \quad -EK]^T F^T \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} < 0,$$

因为 $F^T F \leq I$, 由引理2, 上式等价于

$$\begin{bmatrix} -\varepsilon DD^T - P^{-1} & A_d + B_{d0}K & B_{d1}K \\ (A_d + B_{d0}K)^T & -P + Q & 0 \\ (B_{d1}K)^T & 0 & -Q \end{bmatrix} + [0 \quad EK \quad -EK]^T (\varepsilon^{-1}) [0 \quad EK \quad -EK] < 0.$$

其中 $\varepsilon > 0$, 再由引理1, 上式等价于式(9), 故闭环系统渐近稳定。证毕。

3 仿真分析

针对带有不确定性的长时延网络控制模型

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_{d0} u_k - B_{d1} u_{k-1}, \quad (11)$$

采用状态反馈控制律为 $u_k = Kx_k$, 其中:

$$A_d = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 1 & -3 \end{bmatrix};$$

则该闭环系统是渐近稳定的。

证明 选取 $V(k) = x_k^T P x_k + x_{k-1}^T Q x_{k-1}$, 其中: P, Q 为对称正定阵, 显然

$$V(k) > 0,$$

$$\Delta V(k) = V(k+1) - V(k) =$$

$$x_{k+1}^T P x_{k+1} - x_k^T P x_k - x_{k-1}^T Q x_{k-1},$$

将式(8)代入上式得:

$$\begin{aligned} & x_{k+1}^T P x_{k+1} - x_k^T P x_k - x_{k-1}^T Q x_{k-1} \\ & = [x_k^T, x_{k-1}^T] \Theta \begin{bmatrix} x_k \\ x_{k-1} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

由式(10), $\Theta < 0$, 即

$$\begin{bmatrix} \bar{G}^T P \bar{G} - P - Q & \bar{G}^T P (B_{d1}K - DF EK) \\ (B_{d1}K - DF EK)^T P \bar{G} & (B_{d1}K - DF EK)^T P (B_{d1}K - DF EK) - Q \end{bmatrix} < 0$$

$$\text{等价于} \begin{bmatrix} P^{-1} Q & 0 \\ 0 & -Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (A_d + B_{d0}K + DF EK)^T \\ (B_{d1}K - DF EK)^T \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} (A_d + B_{d0}K - DF EK) & (B_{d1}K - DF EK) \end{bmatrix} < 0.$$

由 Schur 补引理, 上式亦可写为:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & A_d + B_{d0}K & B_{d1}K \\ (A_d + B_{d0}K)^T & -P + Q & 0 \\ (B_{d1}K)^T & 0 & -Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F [0 \quad EK \quad -EK] + [0 \quad EK \quad -EK]^T F^T \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} < 0,$$

因为 $F^T F \leq I$, 由引理2, 上式等价于

$$\begin{bmatrix} -\varepsilon DD^T - P^{-1} & A_d + B_{d0}K & B_{d1}K \\ (A_d + B_{d0}K)^T & -P + Q & 0 \\ (B_{d1}K)^T & 0 & -Q \end{bmatrix} + [0 \quad EK \quad -EK]^T (\varepsilon^{-1}) [0 \quad EK \quad -EK] < 0.$$

其中 $\varepsilon > 0$, 再由引理1, 上式等价于式(9), 故闭环系统渐近稳定。证毕。

$$B_{d0} = \int_{t_0}^{t_1} e^{A_d(t-t_0)} dt B;$$

$$B_{d1} = \int_{t_0}^{t_1} e^{A_d(t-t_0)} dt B.$$

假设网络控制系统的采样周期为 $T=10$ ms, 网络诱导时延随机的分布在2个采样周期内。为了确保

$$e^{A_d(t-t_0-\alpha_i)} < 1, \quad \frac{(e^{A_d(t-t_0-\alpha_i)} - e^{A_d(t-t_0-\alpha_i-1)})}{e^{A_d \alpha_i}} < 1 \text{ 和}$$

$$e^{A_d(t-t_0-\alpha_i)} < 1 \quad (i=1, 2), \text{ 选择 } \alpha_1=0.01, \quad \alpha_2=0. \text{ 因而}$$

$$B_{d0} = \begin{bmatrix} -5.00 \\ -1.653 \end{bmatrix};$$

$$B_{\text{net}} = \begin{bmatrix} 5.00 \\ -1.653 \end{bmatrix};$$

$$D_0 = \begin{bmatrix} 5.01 & 0 \\ 1.55 & -0.33 \end{bmatrix};$$

$$F(\tau_k) = \begin{bmatrix} e^{\lambda_1 \tau_k} & 0 \\ 0 & e^{-3(0.01 - \tau_k)} \end{bmatrix};$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.31 \end{bmatrix}.$$

应用 Matlab 的 LMI 工具箱, 根据定理 1 的要求, 当状态反馈矩阵 $K = [-2.356 \ -2.097]$ 时, 网络控制系统渐近稳定。如果被控系统的初始状态为 $[x_1 \ x_2] = [2.0 \ -0.51]$, 仿真结果如图 2 所示。

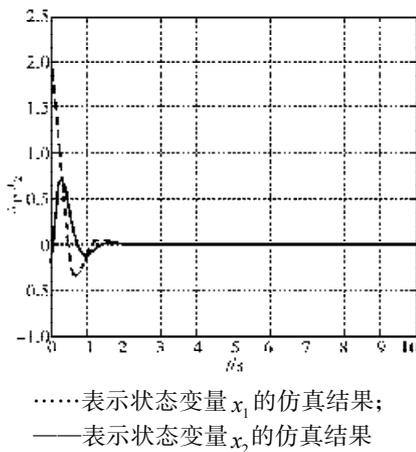


图 2 系统状态仿真结果

Fig. 2 The simulation result of system status

通过仿真结果可以看出, 采用定理 1 设计的状态反馈矩阵能够使长时延网络控制系统渐近稳定。

4 结语

针对长时延网络控制系统, 假设系统的传感器是时间驱动的, 而控制器和执行器为事件驱动。当存在

大于单位采样周期的不确定长时延的情况时, 本文将网络控制系统的一般模型转化为一类不确定线性离散系统, 并分析得出 NCS 稳定性的充分条件, 通过 LMI 工具箱的求解, 可以得到反馈增益阵的参数。该方法简单、可行, 适宜于工程上对网络控制系统控制器的设计。

参考文献:

- [1] Baruch J E F, Cox M J. Remote control and robots: an internet solution[J]. Computing & Control Engineering Control, 1996, 7: 39-45.
- [2] Lian F L, Moyne J R, Tilbury D M, et al. Control performance study of a networked machining cell[C]// Proceedings of the American Control Conference. Chicago: [s.n.], 2000: 2337-2341.
- [3] 黎善斌, 王 智, 张卫东, 等. 网络控制系统的研究现状与展望[J]. 信息与控制, 2003, 32(3): 239-244.
- [4] 朱其新, 胡寿松, 侯 霞. 长时滞网络控制系统的随机稳定性研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2003, 33(3): 368-371.
- [5] Raji R S. Smart networks for control[J]. IEEE Spectrum, 1994, 31(6): 49-55.
- [6] Luck R, Ray A. An observer-based compensator for distributed delays[J]. Automatica, 1990, 26(5): 903-908.
- [7] Luck R, Ray A. Experimental verification of a delay compensation algorithm for integrated communication and control systems[J]. International Journal of Control, 1994, 59(6): 1357-1372.
- [8] 于之训, 陈辉堂, 王月娟. 时延网络控制系统均方指数稳定的研究[J]. 控制与决策, 2000, 15(3): 278-281, 289.
- [9] 樊卫华, 蔡 骅, 陈庆伟, 等. 时延网络控制系统的稳定性[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 880-884.

(责任编辑: 张亦静)