文章编号: 1001-0920(2004)01-0017-05

基于LMI方法的网络化控制系统的 H∞鲁棒控制

姜培刚, 姜偕富, 李春文, 徐文立
(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘 要: 为克服时延和不同步对系统性能产生的影响, 将时延的不确定性转换为系统状态方程系数矩阵的不确定性, 将网络化控制系统的状态向量扩张为增广状态向量, 利用所提出的基于LMI的 H_∞ 鲁棒控制方法, 通过状态的静态反馈控制, 使得系统在没有外界未知扰动影响的情况下, 闭环系统是二次稳定的; 在系统存在外界未知扰动影响时, 闭环系统具有较好的干扰抑制作用. 仿真示例验证了该控制方法的有效性.

关键词: 网络化控制系统; 时延; 不同步; LMI; H_∞控制; 鲁棒控制
中图分类号: TP272 **文献标识码**: A

Robust H∞ control for the networked control systems based on LMI

JIANG Pei-gang, JIANG Xie-fu, LI Chun-wen, XU Wen-li
(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: JIANG Pei-gang, E-mail: jpg99@mails.tsinghua.edu.cn)

Abstract: A new robust H_∞ control method based on the linear matrix inequality (LMI) approach is proposed for control systems connected by network. The uncertainty of time delays is converted to the uncertainty of the parameter matrix, and the states are transformed to the augmented states to eliminate the effect of the asynchronism. The closed-loop system can be quadratically stabilized by the suatic state feedback if no disturbance exists. When the system is affected by unknown disturbance, the closed-loop system has a disturbance attenuation.

Key words: networked control system; delay time; asynchronism; LMI; H_∞ control; robust control

1 引 言

基于现场总线的分布式网络控制系统, 其结构如图 1 所示. 近年来, 这种网络化系统的控制问题引起了许多研究者的兴趣[1~3]. 本文考虑由一个被控对象和一个控制器组成的网络化控制系统, 通过设计适当的控制器, 使得被控对象具有良好的稳定性和对外界未知扰动具有较强的抑制能力.

分布式网络控制系统中的时延可分为 4 类: 1) 被控对象与控制器之间数据传输的时延; 2) 控制器在进行控制时的时延; 3) 控制器与被控对象之间命令传输的时延; 4) 被控对象从接收命令到执行命令的时延(这个时延很小, 一般都予以忽略).

针对网络控制系统中的传输时延(即 1 类和 3 类) 时延, Halevi 和 Ray[1,2]考虑了具有连续时间对象和离散时间控制器的网络控制系统, 系统采用增广状态空间法表示, 从而得到一个有限维的时变离散时间模型, 但该控制方法仅适用于周期性时延的网络系统. Ray[3]和Nilsson等[4]采用随机控制的

收稿日期: 2002-09-26; **修回日期**: 2003-01-03.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69774011); 国家自然科学基金重点项目(69934010); 国家重点基础研究专项基金项目(G1998020307).
作者简介: 姜培刚(1976—), 男, 江苏南通人, 博士生, 从事时延控制、鲁棒控制等研究; 徐文立(1947—), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士生导师, 从事自动控制、计算机视觉及机器人等研究.

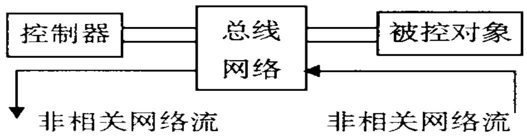


图 1　基于现场总线的网络控制系统

方法, 使系统在存在时延的条件下仍具有较好的期望值, 但这种方法不能保证系统的可靠性和安全性 Walsh 等[5] 通过试一次再丢弃协议的方法, 以此来克服网络时延对系统稳定性的影响, 在此基础上提出线性网络化系统的模型, 并设计控制器使系统是全局指数稳定的 Walsh 等[6] 针对非线性网络化系统, 假定在不存在网络时延的条件下, 设计控制器使闭环系统是全局指数稳定的; 然后在存在网络时延时, 让最大传输时延满足一个不等式, 使闭环系统仍是全局指数稳定的

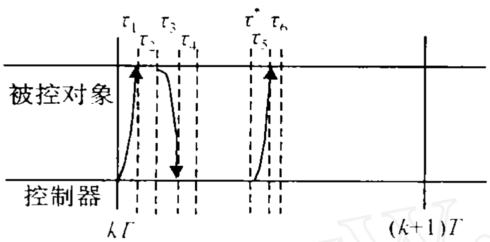


图 2　网络控制系统的工作时序

系统的工作时序如图 2 所示 采样周期为 T, 在每个周期的起始时刻, 控制器发出采样命令, 该命令经时间 τ_1 传到被控对象, 被控对象立即进行采样, 采样时间为 τ_2 采样得到的数据经时间 τ_3 返回到控制器, 根据采样数据计算出下一步的执行命令, 计算时间为 τ_4 到 $kT + \tau^*$ 时刻, 控制器发出执行命令, 被控对象经时间 τ_5 收到命令, 再经编译解释时间 τ_6 后则执行该命令 假设 $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 < \tau^*$. 控制器到 τ^* 时刻发出执行命令, 有助于消除 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ 的不确定性对系统控制的影响, 但同时造成了控制器与被控对象的不同步

由于总线传输的时延 τ_5 的不确定性不大, 可将该时延的不确定性转化为系数矩阵的不确定性, 从而得到具有参数不确定性的离散时间系统状态方程 针对只存在状态系数矩阵不确定的系统, Fikret 等[7] 和 Germain 等[8] 采用静态状态反馈控制, 使得系统是二次稳定的 Xie[9] 设计了动态输出反馈控制律, 使得既有状态系数矩阵不确定性又有输入矩阵不确定性的系统, 达到对干扰抑制率为 1 的二次稳定 Yuan[10] 针对具有外部未知扰动输入而没有控制输入的不确定系统, 通过求解辅助系统, 使原系统具有干扰抑制率为 γ 的二次稳定性 Song 等[11] 针对具有固定状态时延的离散系统, 当满足两个矩阵不等式时, 得到使系统渐近稳定且干扰抑制率为 γ 的静态反馈控制律

本文将被控对象的状态方程离散化 由于不能确切知道执行命令的传输时延 τ_5, 以及被控对象编译和解释命令的时间 τ_6, 离散化后的系统存在时延的不确定性, 为此将时延的不确定性转换为参数矩阵的不确定性 由于控制器和被控对象的不同步性, 离散化后的系统有输入时延(当前周期的输入和上一周期的输入), 为此采用增广向量的方法, 将网络控制系统的状态向量扩张为增广状态向量, 使用增广向量的方法可以克服控制器与被控对象的不同步对系统控制的影响 对于转换后得到的不确定系统, 利用基于LMI的 H_∞ 鲁棒控制方法, 设计状态的静态反馈控制器, 使得系统在没有外界干扰的情况下, 闭环系统是二次稳定的; 在系统存在外界未知扰动时, 闭环系统仍具有较好的干扰抑制率

2　总线网络化控制系统的问题描述

设被控对象具有如下数学模型:

$$\dot{x} = Ax + Bu + \tilde{R}d, \tag{1}$$

$$z = Cx. \tag{2}$$

其中: $x \in R^n, u \in R^{m_1}, d \in R^{m_2}, z \in R_l$ 分别为被控对象的状态变量、系统输入、外界未知扰动输入、控制输出; $A, B, \tilde{R}, C$ 分别为具有相应维数的系数矩阵, 且外界未知扰动 $d \in l_2[0, \infty)$.

离散化并考虑控制器与被控对象之间不同步, 以及延迟时间 τ_5 和 τ_6 的影响, 可得具有时间延迟的网络控制系统的离散时间模型

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_{d0}(\tau)u_k + B_{d1}(\tau)u_{k-1} + \hat{R}d_k, \tag{3}$$

$$z_k = Cx_k. \tag{4}$$

其中

$$A_d = e^{AT},$$

$$B_{d0}(\tau) = \int^{\tau^*-\tau} e^{At}dtB = \int^{\tau^*} e^{At}dtB + \int_{\tau^*}^{\tau^*-\tau} e^{At}dtB,$$

$$B_{d1}(\tau) = \int_{\tau^*-\tau} e^{At}dtB + \int_{\tau^*} e^{At}dtB + \int_{\tau^*-\tau}^{\tau^*} e^{At}dtB,$$

$$\hat{R} = \int e^{At}dt\tilde{R}, \tau = \tau_5 + \tau_6.$$

由于 τ 的不确定性, 将 $\int_{\tau^*}^{\tau^*-\tau} e^{At}dtB$ 和 $\int_{\tau^*-\tau}^{\tau^*} e^{At}dtB$ 作为不确定项来处理, 可得

$$B_{d_0}(\tau_k) = B_{d_0} + \Delta B_0, B_{d_1}(\tau_k) = B_{d_1} + \Delta B_1.$$

由ΔA和ΔB的结构可知, 存在$L \in R^{n\times\alpha}$, $M_1 \in R^{\beta\times n}$, $M_2 \in R^{\beta\times m_1}$, 使得

$$[\Delta B_0 \quad \Delta B_1] = L\Delta_k [M_1 \quad M_2]. \tag{5}$$

其中$\Delta_k \in R^{\alpha\times\beta}$为未知不确定矩阵, 满足$\Delta_k^T \Delta_k \le I$.

3　无外界扰动时系统的鲁棒控制

引理 1 (Schur 补引理)[8]　若已知 3 个矩阵 $Z_1 = Z_1^t$, $0 < Z_2 = Z_2^t$, Z_3, 则 $Z_1 + Z_3^t Z_2^{-1} Z_3 < 0$, 当且仅当

$$\begin{bmatrix} Z_1 & Z_3^t \\ Z_3 & -Z_2 \end{bmatrix} < 0 \text{ or } \begin{bmatrix} -Z_2 & Z_3 \\ Z_3^t & Z_1 \end{bmatrix} < 0.$$

引理 2[12]　给定矩阵 Z_1, Z_2 和 Z_3, 若 $Z_1 + \epsilon^{-1} Z_3 Z_3^t + \epsilon Z_2^t Z_2 < 0$, $\exists\, \epsilon > 0$, 则有

$$Z_1 + Z_3 \Delta_k Z_2 + Z_2^t \Delta_k^t Z_3^t < 0,$$
$$\forall\, \Delta_k^t \Delta_k \le I.$$

由第 2 节可知, L, M_1, M_2 是由系统(3)、T 和网络通信时延 $\tau = \tau_5 + \tau_6$ 决定的

下面给出网络控制系统不存在外界扰动时进行反馈控制的结论

定理 1　当网络控制系统不存在外界扰动时, 即 $d = 0$, 若存在矩阵 K, 对称正定矩阵 P 和 Q, 满足由系统(3)、T 和网络通信时延 $\tau = \tau_5 + \tau_6$ 决定的矩阵不等式

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{21}^T \\ \Pi_{21} & \Pi_{22} \end{bmatrix} < 0. \tag{6}$$

其中

$$\Pi_{11} = (A_d + B_{d0}(\tau)K)^T P (A_d + B_{d0}(\tau)K) - P + Q,$$
$$\Pi_{21} = (B_{d1}(\tau)K)^T P (A_d + B_{d0}(\tau)K),$$
$$\Pi_{22} = (B_{d1}(\tau)K)^T P B_{d1}(\tau)K - Q.$$

则系统(3) 通过反馈控制律 $u_k = Kx_k$ 后, 闭环网络控制系统是二次稳定的　即在有网络通信时延 $\tau = \tau_5 + \tau_6$ 存在的条件下, 闭环网络控制系统具有良好的稳定性能

证明　对于系统(3), 如果采用状态反馈 $u_k = Kx_k$, 则其闭环系统为

$$x_{k+1} = (A_d + B_{d0}(\tau)K)x_k + B_{d1}(\tau)Kx_{k-1}. \tag{7}$$

对系于统(7), 可取 Lyapunov 泛函

$$V_k = x_k^T P x_k + x_{k-1}^T Q x_{k-1}, \tag{8}$$

V_k 沿系统(7) 的差分为

$$\Delta V_k = [x_k^T \quad x_{k-1}^T]\Phi \begin{bmatrix} x_k \\ x_{k-1} \end{bmatrix}.$$

当矩阵不等式(6) 成立时, 有 $\Delta V_k < 0$. 这时闭环系统是二次稳定的 □

为求解矩阵不等式(6), 根据引理 1, 式(6) 等价于

$$\begin{bmatrix} -P+Q & 0 & (A_d + B_{d0}(\tau)K)^T \\ 0 & -Q & (B_{d1}(\tau)K)^T \\ A_d + B_{d0}(\tau)K & B_{d1}(\tau)K & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0. \tag{9}$$

由于

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{bmatrix} \Delta_k [M_1K \quad M_2K \quad 0] + [M_1K \quad M_2K \quad 0]^T \Delta_k^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{bmatrix}^T \le$$
$$\epsilon \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{bmatrix} + \epsilon^{-1}[M_1K \quad M_2K \quad 0]^T \times [M_1K \quad M_2K \quad 0] =$$
$$\begin{bmatrix} \epsilon^{-1}K^T M_1^T M_1 K & \epsilon^{-1}K^T M_1^T M_2 K & 0 \\ \epsilon^{-1}K^T M_2^T M_1 K & \epsilon^{-1}K^T M_2^T M_2 K & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon L L^T \end{bmatrix},$$

这里 $\epsilon > 0$ 为一常数 因而当矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} Q - P + \epsilon^{-1}K^T M_1^T M_1 K & \epsilon^{-1}K^T M_1^T M_2 K & (A_d + B_{d0}K)^T \\ \epsilon^{-1}K^T M_2^T M_1 K & \epsilon^{-1}K^T M_2^T M_2 K - Q & (B_{d1}K)^T \\ A_d + B_{d0}K & B_{d1}K & \epsilon L L^T - P^{-1} \end{bmatrix} < 0$$

成立时, 有矩阵不等式(9) 成立 上述矩阵不等式两端同时乘以对角矩阵 $\mathrm{diag}\{X, X, I, I\}$, 并利用 Schur 补引理, 可得上述矩阵不等式等价于如下线性矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} \hat{Q} - X & 0 & (A_dX + B_{d0}Y)^T & Y^T M_1^T \\ 0 & -\hat{Q} & (B_{d1}Y)^T & Y^T M_2^T \\ A_dX + B_{d0}Y & B_{d1}Y & \epsilon L L^T - X & 0 \\ M_1Y & M_2Y & 0 & -\epsilon I \end{bmatrix} < 0. \tag{10}$$

其中: $X = P^{-1}$, $\hat{Q} = XQX$, $Y = KX$.

推论 1　当网络控制系统不存在外界扰动时, 若存在矩阵 Y, 对称正定矩阵 X 和 $\hat{Q}$, 以及常数 $\epsilon > 0$, 满足由系统(3)、T 和网络通信时延 $\tau = \tau_5 + \tau_6$ 决定的线性矩阵不等式(10), 则系统(3) 通过静态反馈控制 $u_k = Kx_k$ 后, 闭环网络控制系统是二次稳定的 即在有网络通信时延 $\tau = \tau_5 + \tau_6$ 存在的条件下, 闭环网络控制系统具有良好的稳定性能 这时控制器增益矩阵可取 $K = YX^{-1}$.

注 1　线性矩阵不等式(10) 可以方便地由

MATLAB 中的LMI工具箱来求解, 无需调整任何参数 这为系统控制器的设计带来了很大方便

4　存在未知扰动时系统的 H_∞ 鲁棒控制

定理 2　当网络控制系统存在外界未知扰动 d 时, 对于给定的 $\gamma > 0$, 若存在矩阵 K, 对称正定矩阵 P 和 Q, 满足由系统(3)、T 和网络通信时延 $\tau = \tau_5 + \tau_6$ 决定的矩阵不等式

$$\Xi = \begin{bmatrix} \Xi_{11} & \Xi_{21}^{\mathrm T} & \Xi_{31}^{\mathrm T} \\ \Xi_{21} & \Xi_{22} & \Xi_{32}^{\mathrm T} \\ \Xi_{31} & \Xi_{32} & \Xi_{33} \end{bmatrix} < 0. \tag{11}$$

其中

$$\Xi_{11} = (A_d + B_{d0}(\tau)K)^{\mathrm T} P (A_d + B_{d0}(\tau)K) - P + C^{\mathrm T}C + Q,$$
$$\Xi_{21} = (B_{d1}(\tau)K)^{\mathrm T} P (A_d + B_{d0}(\tau)K),$$
$$\Xi_{22} = (B_{d1}(\tau)K)^{\mathrm T} P B_{d1}(\tau)K - Q,$$
$$\Xi_{31} = \hat{R}^{\mathrm T} P (A_d + B_{d0}(\tau)K),$$
$$\Xi_{32} = \hat{R}^{\mathrm T} P B_{d1}(\tau)K,$$
$$\Xi_{33} = \hat{R}^{\mathrm T} P \hat{R} - \gamma^2 I.$$

则系统(3) 通过静态反馈控制 $u_k = Kx_k$ 后, 闭环网络控制系统是二次稳定的, 且可实现对干扰的抑制率为 γ 即在有网络通信时延 $\tau = \tau_5 + \tau_6$ 存在的条件下, 闭环网络控制系统对干扰具有良好的抑制性能

证明　对于系统(3), 如果采用状态反馈 $u_k = Kx_k$, 则其闭环系统为

$$x_{k+1} = (A_d + B_{d0}(\tau)K)x_k + B_{d1}(\tau)Kx_{k-1} + \hat{R}d_k. \tag{12}$$

对于系统(12), 取Lyapunov 泛函为式(8), 则 $\forall\, 0 \neq d_k \in l_2[0, \infty)$, 有

$$J = \sum_{k=0}^{\infty}[z_k^{\mathrm T}z_k - \gamma^2 d_k^{\mathrm T}d_k] \leq \sum_{k=0}^{\infty}[z_k^{\mathrm T}z_k - \gamma^2 d_k^{\mathrm T}d_k + \Delta V_k] = \sum_{k=0}^{\infty}[x_k^{\mathrm T}\ \ x_{k-1}^{\mathrm T}\ \ d_k^{\mathrm T}]\,\Xi\,[x_k\ \ x_{k-1}\ \ d_k]^{\mathrm T}. \tag{13}$$

当矩阵不等式(11) 成立时, 有 $J < 0$. 所以原系统通过静态控制律 $u_k = Kx_k$ 反馈控制后, 闭环系统可达到对外界未知干扰的抑制率为 γ. □

为求解不等式(11), 根据引理1, 式(11) 等价于

$$\begin{bmatrix} Q + C^{\mathrm T}C - P & 0 & 0 & (A_d + B_{d0}(\tau)K)^{\mathrm T} \\ 0 & -Q & 0 & (B_{d1}(\tau)K)^{\mathrm T} \\ 0 & 0 & -\gamma^2 I & \hat{R}^{\mathrm T} \\ A_d + B_{d0}(\tau)K & B_{d1}(\tau)K & \hat{R} & -P^{-1} \end{bmatrix} < 0. \tag{14}$$

仿照第 3 节, 可得当矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} Q + C^{\mathrm T}C - P + \epsilon^{-1}K^{\mathrm T}M_1^{\mathrm T}M_1K & \epsilon^{-1}K^{\mathrm T}M_1^{\mathrm T}M_2K & 0 & (A_d + B_{d0}K)^{\mathrm T} \\ \epsilon^{-1}K^{\mathrm T}M_2^{\mathrm T}M_1K & \epsilon^{-1}K^{\mathrm T}M_2^{\mathrm T}M_2K - Q & 0 & (B_{d1}K)^{\mathrm T} \\ 0 & 0 & -\gamma^2 I & \hat{R}^{\mathrm T} \\ A_d + B_{d0}K & B_{d1}K & \hat{R} & \epsilon LL^{\mathrm T} - P^{-1} \end{bmatrix} < 0$$

成立时, 矩阵不等式(14) 成立, 这里 $\epsilon > 0$ 为一常数 上述矩阵不等式两端同时乘以对角矩阵 $\mathrm{diag}\{X, X, I, I\}$, 并利用 Schur 补引理, 可得上述矩阵不等式等价于如下线性矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} \hat{Q} - X & 0 & 0 & (A_dX + B_{d0}Y)^{\mathrm T} & Y^{\mathrm T}M_1^{\mathrm T} & XC^{\mathrm T} \\ 0 & -\hat{Q} & 0 & (B_{d1}Y)^{\mathrm T} & Y^{\mathrm T}M_2^{\mathrm T} & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma^2 I & \hat{R}^{\mathrm T} & 0 & 0 \\ A_dX + B_{d0}Y & B_{d1}Y & \hat{R} & \epsilon LL^{\mathrm T} - X & 0 & 0 \\ M_1Y & M_2Y & 0 & 0 & -\epsilon I & 0 \\ CX & 0 & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0. \tag{15}$$

其中: $X = P^{-1}$, $\hat{Q} = XQX$, $Y = KX$. □

推论 2　当网络控制系统存在外界未知扰动 d 时, 对于给定的 $\gamma > 0$, 若存在矩阵 Y, 对称正定矩阵 X 和 $\hat{Q}$, 以及常数 $\epsilon > 0$, 满足由系统(3)、T 和网络通信时延 $\tau = \tau_5 + \tau_6$ 决定的线性矩阵不等式(15), 则系统(3) 通过静态反馈控制 $u_k = Kx_k$ 后, 闭环网络控制系统是二次稳定的, 且可实现对干扰的抑制率为 γ 即在有网络通信时延 $\tau = \tau_5 + \tau_6$ 存在的条件下, 闭环网络控制系统对干扰具有良好的抑制性能 这时控制器增益矩阵可取 $K = YX^{-1}$.

5　仿真示例

为验证本文控制方法的有效性, 作者构建了一个实验控制系统(图 3). 用 TMS320C32 模拟被控对象的动态运动过程, 通过CANbus 传输数据, 速率设为 1Mbit/s, 用 PC 模拟控制器的运行, CANbus 控制器采用 SJA1000, PC 机中使用CANbus 的 PCI插卡

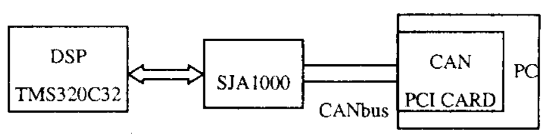


图 3　网络控制系统的实验结构

取DSP 中被控对象的模型

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix}u + \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix}d,$$

$$z = [0.01\ \ 0]x.$$

实验中设置 $T = 10\,\mathrm{ms}$, $\tau^* = 6\,\mathrm{ms}$ 将上式离散化, 得

$$A_d = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 \\ 0 & 0.99 \end{bmatrix}, B_{d0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.012 \end{bmatrix},$$

$$B_{d1} = \begin{bmatrix} 0.000\,1 \\ 0.007\,9 \end{bmatrix}.$$

当通信速率为 1Mbit/s 时, 一帧数据的传输时间小于 1ms, 即 $\tau <$ 1ms. 因此可得

$$L = [0.01 \quad 0.2], M_1 = 0.001, M_2 = 0.01.$$

从式(10) 可解出 $K = [-0.150\,5 \quad -0.267\,1]$, 通过 $u_k = Kx_k$ 反馈控制后, 闭环系统是二次稳定的. 从式(15) 可解出 $K = [-0.013\,3 \quad -0.026\,7]$, $\gamma = 0.8$. 通过 $u_k = Kx_k$ 控制后, 闭环网络控制系统是二次稳定的, 且可实现对干扰的抑制率为 0.8.

实验时把DSP 中动态系统的状态变量 x 的两个分量分别用 4 个字节表示(实数), 然后通过 CANbus 的一帧数据传输到PC 上, 乘以 K 后再把同样结构的结果数据通过 CANbus 传输到DSP 中. 这里不考虑系统的外部未知扰动, 取 $K = [-0.150\,5 \quad -0.267\,1]$. 所得系统状态变量的轨迹如图 4 和图 5 所示.

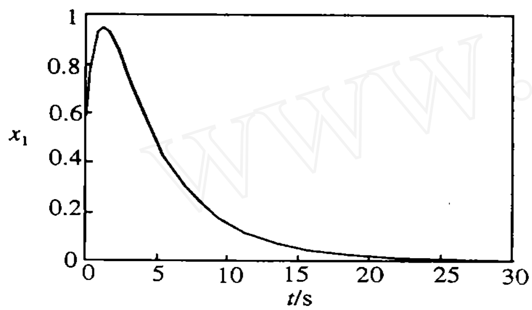


图 4　x_1 运动轨迹

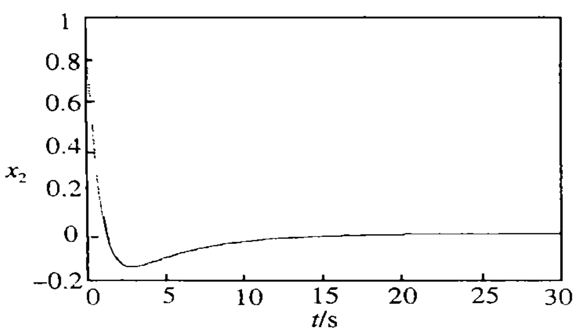


图 5　x_2 运动轨迹

6　结　　论

本文针对基于现场总线的网络系统的控制问题, 将时延的不确定性转换为系数矩阵的不确定性, 将网络控制系统的状态向量扩张为增广状态向量, 利用基于LMI的 H_∞ 鲁棒控制方法, 通过状态的静态反馈控制, 使得系统在没有外界未知扰动影响的情况下, 闭环系统是二次稳定的; 在系统存在外界未知扰动影响时, 闭环系统可以达到对干扰的抑制作用.

本文的控制方法是针对任意维数的控制系统, 在仿真示例中只取一个二维系统作为仿真实验对象. 对于高维系统, 算法过程是相同的. 静态反馈控制时, 由于控制器的输出与控制器的输入呈线性关系, 控制器计算量的增加与维数的增加也呈线性关系, 即维数的增加不会显著增加控制器的计算量. 当然, 系统维数足够高后, 网络的数据传输量会很大. 由于网络带宽是有限的, 过大的数据传输量会影响网络的传输性能, 甚至造成网络的拥塞.

参考文献(References):

[1] Halevi Y, Ray A. Integrated communication and control systems: Part Ⅰ- Analysis [J]. *J of Dynamic Systems Measurement and Control*, 1988, 110 (4): 367-373.

[2] Ray A, Halevi Y. Integrated communication and control systems: Part Ⅱ- Design considerations[J]. *J of Dynamic Systems Measurement and Control*, 1988, 110(4): 374-381.

[3] Ray A. Output feedback control under randomly varying distributed delays[J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 1994, 17(4): 701-711.

[4] Nilsson J Bernhardsson, Wittenmark B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays[J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 57-64.

[5] Walsh G C, Hong Y, Bushnell L. Stability analysis of networked control systems[A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. 1999. 2876-2880.

[6] Walsh G C, Beldiman O, Bushnell L G. Asymptotic behavior of nonlinear networked control systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(7): 1093-1097.

[7] Fikret C, Mohamed A Z. Design of robust discrete control with desirable quadratic stability [J]. *ISA Trans*, 2000, 39(4): 401-406.

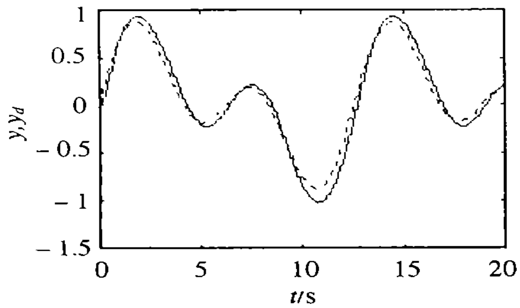
[8] Germain G, Jacques B, Denis A. Robust stabilization of discrete-time linear systems with norm-bounded time-varying uncertainty [J]. *Systems and Control Letters*, 1994, 22(5): 327-339.

[9] Xie L H. Output feedback H_∞ control of systems with parameter uncertainty[J]. *Int J Control*, 1996, 63(4): 741-750.

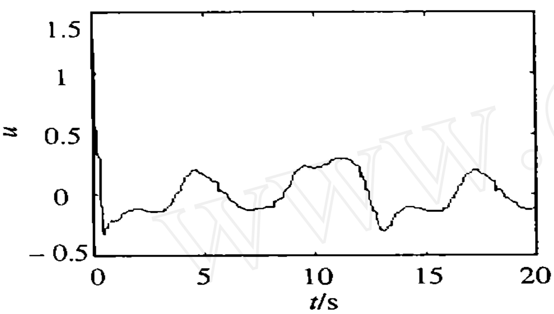
(下转第 26 页)

$$\mu_{A_{2k}^{l}}(z_{2k}) = \exp\left(-\frac{(z_{2k} - 3 + l)^2}{4}\right),$$
$$i = 1, 2, 3, \ k, l = 1, \cdots, 5.$$

$k_1 = 5, k_2 = 2, \sigma_1 = \sigma_2 = 0.2, \sigma = 0.1, \Gamma_1 = \Gamma_2 = \mathrm{diag}(10, 10), x_1(0) = 0, x_2(0) = -0.2, \hat{\epsilon}_2(0) = 0.3$. $\hat{\theta}_1(0)$ 在 $[-1, 1]$ 内随机选取, $\hat{\theta}_2(0)$ 在 $[-2, 2]$ 内随机选取. 仿真结果如图 1 所示, 图 1(a) 中实线表示 y_d, 虚线表示 y.



(a) 系统输出 y 和跟踪曲线 y_d



(b) 控制信号 u

图 1 系统输出、跟踪曲线及控制信号

5 结 论

本文讨论一类严格反馈非线性系统的自适应模糊控制问题. 基于修改的积分型李亚普诺夫函数及模糊系统的逼近性质, 并利用后推设计方法, 提出一种自适应模糊控制新策略. 根据李亚普诺夫方法, 确定了模糊系统中可调参数和逼近误差的自适应律. 理论分析证明了跟踪误差收敛到一个小的残差集内, 并且跟踪精度可通过设计参数来调节.

参考文献(References):

[1] Wang L X. *Adaptive Fuzzy Systems and Control — Design and Stability Analysis* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1994. 102-163.

[2] Sanner R M, Slotine J J E. Gaussian networks for direct adaptive control [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1992, 3(6): 837-863.

[3] Chen S C, Chen W L. Adaptive radial basis function neural network control with variable parameters [J]. *Int J Systems Science*, 2001, 32(4): 413-424.

[4] 张天平. 基于一种修改的李亚普诺夫函数的自适应模糊滑模控制[J]. 自动化学报, 2002, 28(1): 137-142.
(Zhang T P. Adaptive fuzzy sliding mode control based on a modified Lyapunov function [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(1): 137-142.)

[5] Zhang T, Ge S S, Hang C C. Adaptive neural network control for strict-feedback nonlinear systems using backstepping design [J]. *Automatica*, 2000, 36(12): 1835-1846.

[6] Ge S S, Wang C. Direct adaptive NN control of a class of nonlinear systems [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 2002, 13(1): 214-221.

[7] Ge S S, Hang C C, Zhang T. Stable adaptive control for nonlinear multivariable systems with a triangular control structure [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(6): 1221-1225.

[8] 丁刚, 张曾科, 韩曾晋. 非线性系统的鲁棒自适应模糊控制[J]. 自动化学报, 2002, 28(3): 356-362.
(Ding G, Zhang Z K, Han Z J. Robust adaptive fuzzy control of nonlinear systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(3): 356-362.)

(上接第 21 页)

[10] Yuan L, Achenie L E, Jiang W. Robust H_∞ control for linear discrete-time systems with norm-bounded time-varying uncertainty [J]. *Systems and Control Letters*, 1996, 27(4): 190-208.

[11] Song S H, Kim J K. H_∞ control of discrete-time linear systems with norm-bounded uncertainties and time-delays in state [J]. *Automatica*, 1998, 34(1): 137-139.

[12] Mahmoud M S. Robust H_∞ control of discrete systems with uncertain parameters and unknown delays [J]. *Automatica*, 2000, 36(4): 627-635.