第 23 卷 第 9 期 控 制 与 决 策 2008 年 9 月
Vol. 23 No. 9 Control and Decision Sep. 2008

文章编号: 1001-0920(2008)09-1055-05

一类不确定性非线性网络控制系统的扰动抑制

唐功友[1], 张 勇[2]
(1. 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100;
2. 中国石油大学 信息与控制工程学院, 山东 东营 257061)

摘 要: 研究受外部持续扰动的一类不确定性非线性网络控制系统的扰动抑制问题. 提出一种状态变量代换, 将控制时滞转移到闭环控制回路之外, 从而消除了时滞部分对控制系统稳定性的影响. 利用内模原理给出了系统无静差扰动抑制补偿器的设计方法, 运用 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式技术, 证明了保成本控制律的存在条件, 并给出了无静差保成本控制器的设计方法. 仿真结果验证了该控制算法的有效性.

关键词: 网络控制系统; 非线性系统; 保成本控制; 内模原理; 线性矩阵不等式
中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

Disturbance rejection for a class of uncertain nonlinear networked control systems

TANG Gong-you[1], *ZHANG Yong*[2]
(1. College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China. Correspondent: TANG Gong-you, E-mail: gtang@ouc.edu.cn)

Abstract: This paper considers the disturbance rejection problem for a class of uncertain nonlinear networked control systems affected by additive persistent disturbances. We present a state variable substitution which transfers the control time-delay to the outside of control closed-loop such that the impact of time-delay part to control system stability is eliminated. An approach to design zero steady-state error disturbance rejection compensator is proposed by using the internal model principle. The Lyapunov stability theory and linear matrix inequality technology are employed to testify the existence conditions of guaranteed cost control law and design a zero steady-state error guaranteed cost control strategy. Simulation results show the effectiveness of the proposed control algorithm.

Key words: Networked control systems; Nonlinear systems; Guaranteed cost control; Internal model principle; Linear matrix inequality

1 引 言

随着电子计算机和网络通信技术的发展以及对控制和管理的要求不断提高, 网络控制系统的分析和综合问题越来越受到人们的关注, 并已取得了一定的成果[1,2]. 然而, 目前关于网络控制系统的研究大多是基于线性被控对象[3], 对于非线性网络控制系统的分析与设计还是一个富有挑战性的课题. 文献[4]提出一种对非线性系统次优控制的逐次逼近方法. [5]利用构造镇定系统的输出反馈控制律的方法, 研究了一类非线性系统的全局稳定性输出调节问题. [6]研究了带有非线性摄动的时滞系统的保成本鲁棒稳定性问题, 给出了时滞相关的鲁棒稳定性判据和保成本鲁棒稳定性判据, 并给出了系统鲁棒稳定控制器的设计方法.

外部扰动是控制系统普遍存在的现象, 如何将内模原理应用于网络控制系统的扰动抑制控制器的设计, 是一个重要的研究课题. 文献[7]在假定扰动满足一定的匹配条件下, 设计了能抑制匹配扰动的内模调节器. [8]基于内模原理研究了时滞系统的扰动抑制问题, 在持续正弦干扰下设计了扰动补偿器, 使系统能实现无静差最优扰动抑制. [9]研究了阶跃干扰作用下的时滞线性系统无静差控制问题, 利用

收稿日期: 2007-07-14; **修回日期**: 2007-11-21.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60574023, 40776051); 山东省自然科学基金重点项目(Z2005G01).
作者简介: 唐功友(1953—), 男, 山东烟台人, 教授, 博士生导师, 从事时滞系统、非线性系统等研究; 张勇(1979—), 男, 山东东营人, 讲师, 博士, 从事网络控制系统的研究.

内模原理构造出一种新的扰动补偿器,实现了满足匹配条件的最优无静差控制.

本文提出一种状态变量代换,将不确定非线性网络控制系统的时滞项转移到闭环控制回路之外,使具有控制时滞的系统转化为形式上不含时滞的系统,从而消除了时滞部分对控制系统稳定性的影响;进而利用内模原理给出了系统无静差扰动抑制补偿器的设计方法.

2 问题描述

本文研究的网络控制系统的基本结构如图 1 所示. 其中: τ^{sc} 表示传感器到控制器的传输延迟, τ^{ca} 表示控制器到执行器的传输延迟, τ^{c} 为控制量的计算时间. 令 $\tau = \tau^{sc} + \tau^{c} + \tau^{ca}$ 是网络时滞对控制系统的综合效应.

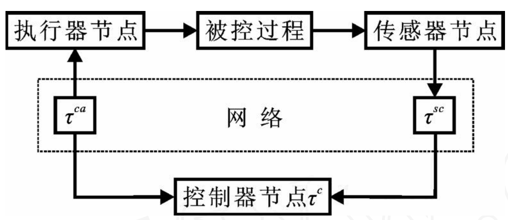

图 1 一般网络控制系统结构

设图 1 所示控制系统的状态方程可描述为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t-\tau) + \\ \qquad f(x,u,v,t) + Dv(t), \\ x(t_0) = x_0. \end{cases} \tag{1}$$

其中: $x \in R^n$, $u \in R^m$ 和 $v \in R^m$ 分别为状态、控制和外部扰动; A, B 和 D 为适当维数的常阵; x_0 为初始状态; f 为不确定非线性项, $f(0,t) = 0$, f 在论域内满足局部 Lipschitz 条件.

根据节点不同的工作方式,可得到不同的系统离散时间模型. 为了对网络控制系统进行建模,根据工程实际背景对系统作如下假设:

1) 传感器节点为时间驱动方式,对被控对象的输出进行等周期采样,采样周期为 $h(h > 0)$;

2) 控制器和执行器节点均为事件驱动方式,即信息的到达时间为相应节点的动作时间;

3) 时滞满足 $(M-1)h < \tau \leq Mh$, 其中 $M \geq 1$ 为常数.

将网络控制系统(1) 离散化,可得到离散化模型

$$\begin{cases} x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma_0 u(k-M+1) + \\ \qquad \Gamma_1 u(k-M) + \bar{f} + \bar{D}v(k), \\ x(0) = x_0. \end{cases} \tag{2}$$

其中

$$\Phi = e^{Ah}, \ \Gamma_0 = \int_0^{Mh-\tau} e^{At}dtB, \ \Gamma_1 = \int_{Mh-\tau}^{h} e^{At}dtB,$$

$$\bar{D} = \int_0^h e^{At}dtD, \ \bar{f} = \int_0^h e^{At}dtf(x,u,v,k).$$

这里提出如下状态变量代换:

$$z(k) = x(k) + \sum_{j=k-M+1}^{k-1}\Phi^{k-j-1}\bar{\Gamma}_0 u(j) + \sum_{j=k-M}^{k-1}\Phi^{k-j-1}\bar{\Gamma}_1 u(j). \tag{3}$$

其中: $\bar{\Gamma}_0 = \Phi^{M+1}\Gamma_0$, $\bar{\Gamma}_1 = \Phi^{M}\Gamma_1$. 从而将系统(2) 变换为形式上无时滞的系统

$$\begin{cases} z(k+1) = \Phi z(k) + \Gamma u(k) + \bar{f} + \bar{D}v(k), \\ z(0) = x_0, \\ x(k) = z(k) - \sum\limits_{j=k-M+1}^{k-1}\Phi^{k-j-1}\bar{\Gamma}_0 u(j) - \\ \qquad \sum\limits_{j=k-M}^{k-1}\Phi^{k-j-1}\bar{\Gamma}_1 u(j). \end{cases} \tag{4}$$

其中 $\Gamma = \bar{\Gamma}_0 + \bar{\Gamma}_1$.

因为 τ 是时变和不确定的,所以 Γ_0 和 Γ_1 是时变不确定矩阵. 对于矩阵 Γ,作如下变换:

$$\Gamma = \Phi^{M+1}\int_0^{Mh-\tau} e^{At}dtB + \Phi^{M}\int_{Mh-\tau}^{h} e^{At}dtB = \frac{1}{2}\Phi^{M}(\Phi + I)\int_0^h e^{At}dtB + \Phi^{M}(\Phi - I)\Big[\int_0^{\alpha(k)h} e^{At}dt - \frac{1}{2}\int_0^h e^{At}dt\Big]B, \tag{5}$$

其中 $0 \leq \alpha(k) \leq 1$ 为关于 k 的不确定时变标量.

不失一般性,假设矩阵 A 可以对角化,则有 $A = \bar{P}^{-1}\Lambda\bar{P}$. 其中: $\Lambda = \mathrm{daig}\{\lambda_1, \cdots, \lambda_n\}$, λ_i 为矩阵 A 的特征值; $\bar{P}$ 为矩阵 A 的特征向量组成的矩阵.

下面进一步化简式(5),有

$$\int_0^{\alpha(k)h} e^{At}dt - \frac{1}{2}\int_0^h e^{At}dt = \bar{P}^{-1}\mathrm{diag}\Big\{\int_0^{\alpha(k)h} e^{\lambda_1 t}dt - \frac{1}{2}\int_0^h e^{\lambda_1 t}dt, \cdots, \int_0^{\alpha(k)h} e^{\lambda_n t}dt - \frac{1}{2}\int_0^h e^{\lambda_n t}dt\Big\}\bar{P} = \frac{1}{2}\int_0^h e^{At}dt\bar{P}^{-1}F(k)\bar{P}.$$

其中

$$F(k) = \mathrm{diag}\{\gamma_1(k), \cdots, \gamma_n(k)\};$$

$$\gamma_i(k) = \begin{cases} \dfrac{2e^{\alpha(k)h\lambda_i} - e^{h\lambda_i} - 1}{e^{h\lambda_i} - 1}, \ \lambda_i \neq 0; \\ 2\alpha(k) - 1, \ \lambda_i = 0. \end{cases}$$

令

$$G = \frac{1}{2}\Phi^{M}(\Phi + I)\int_0^h e^{At}dtB,$$

$$L = \beta_1\Phi^{M}(\Phi - I)\int_0^h e^{At}dt\bar{P}^{-1}, \ N = \beta_2\bar{P}B.$$

其中 β_1 和 β_2 为满足 $2\beta_1\beta_2 = 1$ 的实数.

通过以上变换可将式(4) 改写为

$$\begin{cases} z(k+1) = \\ \Phi z(k) + (G + LF(k)N)u(k) + \bar{f} + \bar{D}v(k), \\ z(0) = x_0. \end{cases} \tag{6}$$

显然, $F^2(k) \le I$ 成立. 假设外部扰动 v 的离散化动态特性可由以下外系统产生:

$$v(k+1) = \bar{G}v(k),\ v(0) = v_0, \tag{7}$$

其中 $\bar{G}$ 是 $m \times m$ 常量矩阵.

为了研究无静差扰动抑制问题,根据数学推理的需要给出以下假设:

4) $\lim\limits_{k\to\infty} v(k) \ne 0$,即矩阵 $\bar{G}$ 不是渐近稳定的;

5) (Φ, Γ) 是完全可控的;

6) $(\Gamma, \bar{D})$ 满足匹配条件

$$\mathrm{Rank}\,\Gamma = \mathrm{Rank}\,\bar{D} = \mathrm{Rank}(\Gamma\quad \bar{D}) = m.$$

本文的目的是要设计一个控制律,使得系统实现无静差扰动抑制.

由假设 6) 可知,存在唯一可逆矩阵 $\bar{M} \in R^{m\times m}$,使 $\bar{D} = \Gamma\bar{M}$ 成立. 于是系统(4) 可写成

$$\begin{cases} z(k+1) = \Phi z(k) + \Gamma(u(k) + \bar{v}(k)) + \bar{f}, \\ z(0) = x_0. \end{cases} \tag{8}$$

其中 $\bar{v}(k) = \bar{M}v(k)$ 可视为等价的 m 维扰动. 令

$$\bar{u}(k) = u(k) + \bar{v}(k), \tag{9}$$

则

$$\bar{u}(k+1) = u(k+1) + \bar{M}\bar{G}v(k). \tag{10}$$

将 $\bar{v}(k) = \bar{M}v(k)$ 和式(9) 代入式(10),得到

$$\bar{u}(k+1) = \bar{M}\bar{G}\bar{M}^{-1}[\bar{u}(k) - u(k)] + u(k+1). \tag{11}$$

定义新的状态 $\hat{z}(k)$ 和虚拟控制 $\hat{u}(k)$ 为

$$\begin{cases} \hat{z}(k) = [z^{\mathrm{T}}(k)\quad \bar{u}^{\mathrm{T}}(k)]^{\mathrm{T}}, \\ \hat{u}(k) = u(k+1) - \bar{M}\bar{G}\bar{M}^{-1}u(k). \end{cases} \tag{12}$$

由式(8),(9),(11) 和(12) 可得 $n+m$ 维增广系统

$$\hat{z}(k+1) = \hat{\Phi}\hat{z}(k) + \hat{\Gamma}\hat{z}(k) + \hat{f}. \tag{13}$$

其中

$$\begin{cases} \hat{\Phi} = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma \\ 0 & \bar{M}\bar{G}\bar{M}^{-1} \end{bmatrix} = \hat{\Phi}_0 + M_0F(k)N_0, \\ \hat{\Gamma} = [0\quad I_m]^{\mathrm{T}},\ \hat{f} = [\bar{f}^{\mathrm{T}}\quad 0]^{\mathrm{T}}. \end{cases} \tag{14}$$

假设不确定非线性摄动项 $\bar{f}$ 满足

$$\bar{f}^{\mathrm{T}}\bar{f} \le (x^{\mathrm{T}}, u^{\mathrm{T}}, v^{\mathrm{T}})\bar{H}(x^{\mathrm{T}}, u^{\mathrm{T}}, v^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}} = \hat{z}^{\mathrm{T}}(k)H\hat{z}(k), \tag{15}$$

其中 H 和 $\bar{H}$ 为已知的正定矩阵.

对系统(13) 取二次型成本函数

$$J = \sum_{k=0}^{\infty}[\hat{z}^{\mathrm{T}}(k)Q\hat{z}(k) + \hat{u}^{\mathrm{T}}(k)R\hat{u}(k)], \tag{16}$$

其中 Q 和 R 是给定的适当维数的正定矩阵.

注 1　增广系统(13) 的闭环系统的渐近稳定性,等价于系统(2) 在持续扰动作用下是无静差的,即 $\lim\limits_{k\to\infty} x(k) = 0$.

3　主要结果

本文的目的是对系统(1) 和(16) 设计一个无静差保成本控制律 $u(k)$. 由注 1 可知,这一问题等价于对系统(13) 和(16),设计一个保成本控制律 $\hat{u}(k)$. 为此,首先研究系统(13) 和(16),设计一个无记忆状态反馈

$$\hat{u}(k) = K\hat{z}(k). \tag{17}$$

其中 $K \in R^{m\times(n+m)}$ 是待定的定常反馈增益矩阵,使得对于所有允许的不确定性,闭环系统

$$\hat{z}(k+1) = (\hat{\Phi} + \hat{\Gamma}K)\hat{z}(k) + \hat{f} \tag{18}$$

是渐近稳定的. 相应的闭环成本函数(16) 满足 $J \le J^*$,其中 J^* 为某个确定的常数.

定理 1　对于增广系统(13) 和性能指标(16),如果存在矩阵 K,对称正定阵 $P \in R^{(n+m)\times(n+m)}$ 和常数 $\varepsilon_1 > 0$,使得对于所有允许的不确定性,有如下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Sigma & (\hat{\Phi} + \hat{\Gamma}K)^{\mathrm{T}}P \\ P(\hat{\Phi} + \hat{\Gamma}K) & P - \varepsilon_1^{-1}I \end{bmatrix} < 0. \tag{19}$$

其中

$$\Sigma = (\hat{\Phi} + \hat{\Gamma}K)^{\mathrm{T}}P(\hat{\Phi} + \hat{\Gamma}K) - S,$$
$$S = P - Q - K^{\mathrm{T}}RK - \varepsilon_1^{-1}H.$$

则式(17) 是增广系统(13) 的一个保成本控制律. 相应的闭环性能指标满足

$$J \le \hat{z}^{\mathrm{T}}(0)P\hat{z}(0). \tag{20}$$

系统(1) 关于性能指标(16) 的无静差保成本控制律 $u^*(k)$ 由下式确定:

$$\begin{cases} s(k+1) = \\ (\bar{M}\bar{G}\bar{M}^{-1} + K_2)s(k) + K_1z(k) + K_2\bar{M}v(k), \\ u^*(k) = s(k). \end{cases} \tag{21}$$

其中: $K = [K_1\quad K_2]$, $K_1 \in R^{m\times n}$, $K_2 \in R^{m\times m}$.

证明　选取离散 Lyapunov 函数 $V = \hat{z}^{\mathrm{T}}(k)P\hat{z}(k)$,沿系统(18) 求 Lyapunov 函数的向前差分

$$\Delta V = \hat{z}^{\mathrm{T}}(k+1)P\hat{z}(k+1) - \hat{z}^{\mathrm{T}}(k)P\hat{z}(k) \le$$

$$\begin{bmatrix} \hat{z}(k) \\ \hat{f} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \Sigma - Q - K^{\mathrm{T}} R K & (\hat{\Phi} + \hat{\Gamma} K)^{\mathrm{T}} P \\ P(\hat{\Phi} + \hat{\Gamma} K) & P - \varepsilon_1^{-1} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{z}(k) \\ \hat{f} \end{bmatrix}. \tag{22}$$

由不等式(19) 可得

$$\Delta V < -\hat{z}^{\mathrm{T}}(k)(Q + K^{\mathrm{T}} R K)\hat{z}(k) \leqslant -\lambda_{\min}(Q + K^{\mathrm{T}} R K)\|\hat{z}(k)\|^2, \tag{23}$$

其中 $\lambda_{\min}(\cdot)$ 表示矩阵 $(\cdot)$ 的最小特征值. 由 Lyapunov 稳定性理论可知,闭环系统(18) 是渐近稳定的. 进而由不等式(23) 得到

$$-\Delta V[\hat{z}(k)] > \hat{z}^{\mathrm{T}}(k)(Q + K^{\mathrm{T}} R K)\hat{z}(k). \tag{24}$$

上式两边对 k 从 0 到 ∞求和,利用系统的稳定性可得式(20). 这说明式(17) 为增广系统的一个保成本控制律.

取 $K = [K_1 \quad K_2]$, $K_1 \in R^{m\times n}$, $K_2 \in R^{m\times m}$,则控制律(17) 可写成

$$\hat{u}(k) = K_1 z(k) + K_2 \bar{u}(k). \tag{25}$$

令 $s(k) = u(k)$,将式(25),(9) 和 $\bar{v}(k) = \bar{M} v(k)$ 代入式(12) 第 2 式,即可得到式(21). □

以下定理利用线性矩阵不等式的可行性给出保成本控制器的构造方法,从而确定 K 的值.

定理 2 对于系统(13) 和性能指标(16),如果存在对称正定阵 $X \in R^{(n+m)\times(n+m)}$,矩阵 $W \in R^{m\times(n+m)}$ 和常数 $\varepsilon_1 > 0$, $\varepsilon_2 > 0$,使得如下矩阵不等式成立:

$$\left[\begin{array}{ccccccc} -X + \varepsilon_2 M_0 M_0^{\mathrm{T}} & \hat{\Phi}_0 X + \hat{\Gamma} W & \varepsilon_1 I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (\hat{\Phi}_0 X + \hat{\Gamma} W)^{\mathrm{T}} & -X & 0 & X N_0^{\mathrm{T}} & X & W^{\mathrm{T}} & X \\ \varepsilon_1 I & 0 & -\varepsilon_1 I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_0 X & 0 & -\varepsilon_2 I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & -Q^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & W & 0 & 0 & 0 & -R^{-1} & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_1 H^{-1} \end{array}\right] < 0. \tag{26}$$

进而,如果矩阵不等式(26) 有一个可行解 ε_1, ε_2, W, X,则式(17) 是增广系统(13) 的一个保成本控制律,其中 $K = W X^{-1}$. 相应的闭环性能指标满足

$$J \leqslant \lambda_{\max}(X^{-1})\|\hat{z}(0)\|^2 = J^*. \tag{27}$$

系统(1) 关于性能指标(16) 的无静差保成本控制律 $u^*(k)$ 由式(21) 确定.

证明 矩阵不等式(19) 可写成

$$\begin{bmatrix} (\hat{\Phi} + \hat{\Gamma} K)^{\mathrm{T}} \\ I \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} (\hat{\Phi} + \hat{\Gamma} K)^{\mathrm{T}} \\ I \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} - \begin{bmatrix} S & 0 \\ 0 & \varepsilon_1^{-1} I \end{bmatrix} < 0. \tag{28}$$

根据矩阵的 Schur 补[10],并注意到式(14),则式(28) 等价于

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & \hat{\Phi} + \hat{\Gamma} K & I \\ (\hat{\Phi} + \hat{\Gamma} K)^{\mathrm{T}} & -S & 0 \\ I & 0 & -\varepsilon_1^{-1} I \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & \hat{\Phi}_0 + \hat{\Gamma} K & I \\ (\hat{\Phi}_0 + \hat{\Gamma} K)^{\mathrm{T}} & -S & 0 \\ I & 0 & -\varepsilon_1^{-1} I \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} M_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F \begin{bmatrix} 0 \\ N_0^{\mathrm{T}} \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \begin{bmatrix} 0 \\ N_0^{\mathrm{T}} \\ 0 \end{bmatrix} F^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} M_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} < 0.$$

利用文献[11] 中的相关结论和矩阵的 Schur 补性质,并注意到 $F^2(k) \leqslant I$,上式对所有允许的不确定性均成立,当且仅当存在一个标量 $\varepsilon_2 > 0$,使得

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} + \varepsilon_2 M_0 M_0^{\mathrm{T}} & \hat{\Phi}_0 + \hat{\Gamma} K & I & 0 \\ (\hat{\Phi}_0 + \hat{\Gamma} K)^{\mathrm{T}} & -S & 0 & N_0^{\mathrm{T}} \\ I & 0 & -\varepsilon_1^{-1} I & 0 \\ 0 & N_0 & 0 & -\varepsilon_2 I \end{bmatrix} < 0.$$

对以上不等式分别左乘和右乘矩阵

$$\text{Block-diag}\{I, P^{-1}, \varepsilon_1 I, I\}. \tag{29}$$

并记 $X = P^{-1}$, $W = K P^{-1}$,再次利用矩阵的 Schur 补性质,即可得到矩阵不等式(26).

如果矩阵不等式(26) 有一个可行解 ε_1, ε_2, W, X,则可从以上证明和定理 1 得到式(17) 是增广系统的一个保成本控制律,其中 $K = W X^{-1}$,并且相应的闭环性能上界满足式(27).

取 $K = [K_1 \quad K_2]$, $K_1 \in R^{m\times n}$, $K_2 \in R^{m\times m}$,则控制律(17) 可成式(25). 令 $s(k) = u(k)$,将式(25),(9) 和 $\bar{v}(k) = \bar{M} v(k)$ 代入式(12) 第 2 式,即可得到式(21). □

注 2 在网络控制系统中,时滞的不确定性会使系统的结构或参数发生改变,不可避免地影响系统的性能,严重时会使系统失稳. 本文提出的变量代换(3),可将时滞项转移到闭环控制回路之外,使具有控制时滞的系统转化为形式上不含时滞的系统,从而消除了时滞对控制系统稳定性的影响.

等效的闭环网络控制系统结构如图 2 所示.

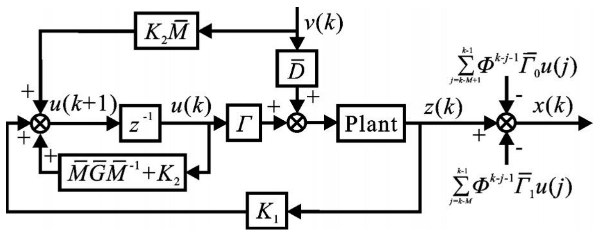

图 2　等效的闭环网络控制系统结构

4　仿真算例

考虑网络控制系统的状态方程(1)，其中

$$A = \begin{bmatrix} 0.1 & -0.8 \\ -1 & 0.2 \end{bmatrix},$$

$$B = D = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix},\ x_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix}.$$

取 $h = 0.1, M = 1$，对系统进行离散化，得到新的状态方程对应的参数矩阵

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} 1.0141 & -0.0813 \\ -0.1016 & 1.0243 \end{bmatrix},$$

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} -0.1047 \\ 0.1062 \end{bmatrix},\ G = \begin{bmatrix} -0.1002 \\ 0.1002 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} -0.0033 & 0.0024 \\ 0.0046 & 0.0026 \end{bmatrix},$$

$$N = \begin{bmatrix} 1.3329 \\ -0.0370 \end{bmatrix}.$$

取 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1, Q = I_3, R = 0.2, H = 0.1I_3$，利用 LMI 工具箱中的 feasp 求解器进行仿真运算. 当外部扰动状态矩阵 $\bar{G} = -1$ 时，可求得

$$X = \begin{bmatrix} 0.4777 & 0.0785 & 0.0317 \\ 0.0785 & 0.4724 & -0.0311 \\ 0.0317 & -0.0311 & 0.5193 \end{bmatrix},$$

$$W = [0.0551 \quad -0.0537 \quad 0.4838].$$

取 $v_0 = 1$，由定理可得

$$K_1 = [0.0644 \quad -0.0635],$$

$$K_2 = 0.9239,\ J^* = 15.7036.$$

当外部扰动状态矩阵 $\bar{G} = -2$ 时，可求得

$$X = \begin{bmatrix} 0.4719 & 0.0791 & 0.0257 \\ 0.0791 & 0.4667 & -0.0252 \\ 0.0257 & -0.0252 & 0.4479 \end{bmatrix},$$

$$W = [0.0693 \quad -0.0677 \quad 0.8471].$$

同样取 $v_0 = 1$，由定理可得

$$K_1 = [0.0531 \quad -0.0523],$$

$$K_2 = 1.8853,\ J^* = 16.0906.$$

可以看出，通过对外部扰动状态矩阵 $\bar{G}$ 的不同取值进行仿真比较，本文所设计的控制器对外部持续扰动和不确定性非线性均具有良好的鲁棒性.

5　结　论

本文提出一种变量代换方法，将时滞项转移到闭环控制回路之外，使具有控制时滞的系统转化为形式上不含时滞的系统. 利用内模原理给出了系统无静差扰动抑制补偿器的设计方法. 运用 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式技术，给出了保成本控制律的存在条件. 以线性矩阵不等式的形式给出保成本控制器的设计方法. 数值仿真结果验证了该方法的有效性.

参考文献(References)

[1] Yue D, Han Q L, Lam J. Network-based robust H_∞ control of systems with uncertainty[J]. Automatica, 2005, 41(6): 999-1007.

[2] Yue D, Han Q L, Peng C. State feedback controller design of networked control systems[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems Ⅱ: Express Briefs, 2004, 51(11): 640-644.

[3] Zhivoglyadov P V, Middleton R H. Networked control design for linear systems[J]. Automatica, 2003, 39(4): 743-750.

[4] Tang G Y. Suboptimal control for nonlinear systems: A successive approximation approach[J]. Systems and Control Letters, 2005, 54(5): 429-434.

[5] Fridman E. Output regulation of nonlinear systems with delay[J]. Systems and Control Letters, 2003, 50(2): 81-93.

[6] Xie N, Tang G Y. Delay-dependent nonfragile guaranteed cost control for nonlinear time-delay systems[J]. Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications, 2006, 64(9): 2084-2097.

[7] Marconi L, Isidori A, Serrani A. Input disturbance suppression for a class of feedforward uncertain nonlinear systems[J]. Systems and Control Letters, 2002, 45(3): 227-236.

[8] Tang G Y, Zhang S M. Optimal rejection with zero steady-state error of sinusoidal disturbances for time-delay systems[J]. Asian J of Control, 2006, 8(2): 117-123.

[9] 唐功友，高洪伟，董瑞. 带阶跃扰动的线性时滞系统最优无静差控制[J]. 控制与决策，2006，21(12)：1417-1420.
(Tang G Y, Gao H W, Dong R. Optimal zero steady-state error control to step disturbances for linear systems with time-delay[J]. Control and Decision, 2006, 21(12): 1417-1420.)

(下转第 1064 页)

比,鼠群算法具有一定的优越性.

参考文献(References)

[1] 张纯刚, 席裕庚. 全局环境未知时基于滚动窗口的机器人路径规划[J]. 中国科学(E 辑), 2001, 31(1): 51-58.
(Zhang C G, Xi Y G. Robot path planning based on rolling window in global unknown environment [J]. Science in China (Series E), 2001, 31(1): 51-58.)

[2] 席裕庚, 张纯刚. 一类动态不确定环境下机器人的滚动路径规划[J]. 自动化学报, 2002, 28(2): 161-174.
(Xi Y G, Zhang C G. Rolling path planning of mobile robot in a kind of dynamic uncertain environment [J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(2): 161-174.)

[3] Cai Z X, Peng Z H. Cooperative coevolutionary adaptive genetic algorithm in path planning of cooperative multi-mobile robot systems[J]. J of Intelligent and Robotic Systems, 2002, 33(4): 61-71.

[4] Wang C M, Soh Y C, Wang H, et al. A hierarchical genetic algorithm for path planning in a static environment with obstacles[C]. IEEE CCECE Canadian Conf on Electrical and Computer Engineering. Manitoba, 2002, 3: 1652-1657.

[5] 樊晓平, 罗熊, 易晟, 等. 复杂环境下基于蚁群优化算法的机器人路径规划[J]. 控制与决策, 2004, 19(2): 166-170.
(Fan X P, Luo X, Yi S, et al. Path planning for robots based on ant colony optimization algorithm under complex environment[J]. Control and Decision, 2004, 19(2): 166-170.)

[6] 朱庆保. 复杂环境下机器人路径规划蚂蚁算法[J]. 自动化学报, 2006, 32(4): 586-593.
(Zhu Q B. Ant algorithm for path planning of mobile robot in a complex environment[J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(4): 586-593.)

[7] Bruce J, Veloso M. Real-time randomized path planning for robot navigation[C]. Proc of IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and System. Lausanne, 2002, 3: 2383-2388.

[8] Yi X, He Y, Guan X. Cooperative location model under the nearest neighbor criterion position location and navigation[C]. Proc of PLANS 2004. Monterey, 2004: 658-661.

[9] Chengdong W, Ying Z, Mengxin L, et al. A rough set GA-based hybrid method for robot path planning[J]. Int J of Automation and Computing, 2006, 3(1): 29-34.

[10] Hartmut S, Jrg H, Jens W. Path planning for a fuzzy controlled autonomous mobile robot[C]. Proc of 5th IEEE Int Conf on Fuzzy Systems. Augustin: IEEE Press, 1996, 8-11: 1660-1665.

[11] Ni B, Chen X, Zhang L M, et al. Recurrent neural network for robot path planning[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 188-191.

[12] 樊长虹, 陈卫东, 席裕庚. 动态未知环境下一种 Hopfield 神经网络路径规划方法[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(3): 345-350.
(Fan C H, Chen W D, Xi Y G. Hopfield neural networks for path planning in dynamic and unknown environments[J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(3): 345-350.)

[13] Dorigo M, Stutzle T. Ant colony optimization[M]. Cabridge: MIT Press, 2004.

(上接第 1059 页)

[10] Albert A. Conditions for positive and non-negative definiteness in terms of pseudoinverses[J]. SIAM J on Applied Mathematics, 1969, 17(2): 434-40.

[11] Barmish B R. Necessary and sufficient conditions for quadratic stabilizability of an uncertain system[J]. J of Optimization Theory and Applications, 1985, 46(4): 399-408.