Vol. 35 (2015)
No. 2

数 学 杂 志
J. of Math. (PRC)

一类非线性时滞网络控制系统的无源性分析

刘云冰 , 赵昀峰, 陈贵词
(武汉科技大学理学院, 湖北 武汉 430081)

摘 要: 本文研究了一类非线性时滞网络控制系统的无源性问题. 利用 Lyapunov 稳定性理论, 结合线性矩阵不等式 (LMI) 技术, 通过构造 Lyapunov-Krasovskii 泛函, 在考虑两种不同时滞的情况下, 获得了系统满足无源性的充分条件, 最后通过仿真算例验证了结论的正确性和方法的有效性.

关 键 词: 网络控制系统; 时滞; 线性矩阵不等式 (LMI); 无源性
MR(2010) **主题分类号**: 93C10 **中 图 分 类 号**: O231.2
文 献 标 识 码: A **文 章 编 号**: 0255-7797(2015)02-0352-09

1 引言

网络控制系统 (Networked Control Systems, NCS) 是通过通信网络代替传统的点对点式的连接方式构成闭环控制系统. 相对于传统的控制系统, 网络控制系统有成本低、安装维护简便、灵活性高等特点 [1]. 无源性作为耗散性的一个特例, 将系统输入输出的乘积作为能量供给率, 体现了系统在有界输入条件下能量的衰减特性, 系统无源可以保持系统内部稳定. 无源性和稳定性之间有着紧密的联系, 无源性理论可用来解决非线性系统的稳定性问题. 另外无源性也为 Lyapunov 函数的构造提供了新的有效途径, 无源性与 Lyapunov 稳定性的关系可以通过将存储函数用作 Lyapunov 函数来建立 [2].

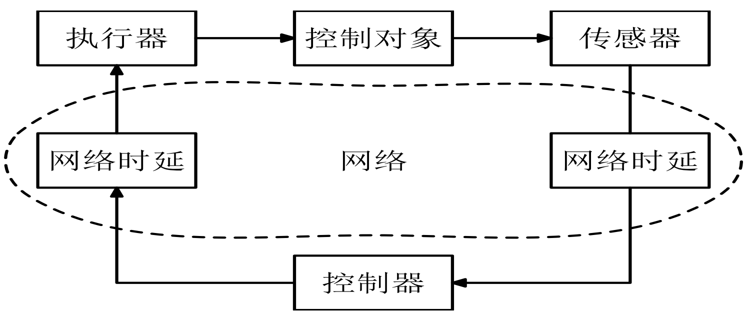

图 1: 时滞网络控制系统模型

有关网络控制系统和无源性, 近年来学者已做了大量工作, 文献 [3] 考察了线性广义系统的无源性控制问题, 得到了闭环系统严格无源的充分条件; 文献 [4–5] 研究一类具有时延网络控制系统的无源控制问题, 推导出了闭环系统渐近稳定且满足无源性的充分条件以及无源控

*收稿日期: 2014-04-04 接收日期: 2014-09-24
基金项目: 国家自然科学基金资助 (61104127); 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室基金资助 (Y2013020).
作者简介: 刘云冰 (1972–), 男, 湖北洪湖, 副教授, 主要研究方向: 网络控制系统, 鲁棒控制.

制器的设计方法; 文献 [6] 针对一类有界范数不确定性的仿射非线性系统, 研究了它的鲁棒无源性问题; 文献 [7] 研究分析了带有时滞的网络控制系统的鲁棒稳定性; 文献 [8] 则研究了离散广义系统在有界能量外部输入作用下的无源控制问题, 得到了离散广义系统容许且严格无源的充分条件并且给出了状态反馈控制器; 文献 [9] 给出了具有时变时滞的离散广义系统稳定的充分条件, 并且推广了离散广义系统稳定与镇定的相关结果. 但据作者所知具有多时滞和非线性扰动的网络控制系统还较少研究. 因此, 本文针对一类非线性时滞网络控制系统, 研究了其无源性. 运用线性矩阵不等式（LMI）和 Lyapunov 理论, 推导出系统满足无源性的充分条件.

2 系统描述

在本文中, 我们主要考虑如下具有非线性扰动的网络控制对象模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_p(t) \ = \ A_p x_p(t) + B_p u_p(t) + G_p \omega_p(t) + B_f f(x(t)), \\ y_p(t) = C_p x_p(t) + E_p \omega_p(t), \end{cases} \tag{2.1}$$

其中 $x_p(t)$ 是控制对象状态, $u_p(t)$ 是对象输入, $y_p(t)$ 是对象输出, $\omega_p(t)$ 是外部干扰输入, A_p, B_p 和 C_p, B_f, G_p, E_p 是具有适当维数的实常数矩阵. $f(x(t))$ 是外部非线性扰动, 且满足:

$$||f(x(t))|| \leq \alpha ||x(t)||, \forall t > 0, \tag{2.2}$$

其中 $\alpha > 0$ 为正常数. 由 (2.2) 式可以看出存在一个正常数 $\kappa > 0$ 使得下面不等式成立:

$$\kappa(\alpha^2 x^T(t) x(t) - f^T(x(t)) f(x(t)) \geq 0. \tag{2.3}$$

网络控制系统中具有时滞的控制器可以描述为:

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + B_c u_c(t) + G_c \omega_c(t), \\ y_c(t) = C_c x_c(t - \tau_c(t)) + D_c u_c(t - \tau_c(t)), \end{cases} \tag{2.4}$$

其中 $x_c(t)$ 是控制器状态, $u_c(t)$ 是控制器输入, $y_c(t)$ 是控制器输出, $\omega_c(t)$ 是外部干扰输入, A_c, B_c 和 C_c, G_c 是具有适当维数的实常数矩阵, $\tau_c(t)$ 是控制器中的时滞.

控制对象和控制器之间的闭环系统中的通信时滞可以建模为:

$$\begin{cases} u_c(t) = y_p(t - \tau_{sc}(t)), \\ u_p(t) = y_c(t - \tau_{ca}(t)), \end{cases} \tag{2.5}$$

其中 $\tau_{sc}(t)$ 是传感器到控制器的网络时滞, $\tau_{ca}(t)$ 是控制器到执行器的网络时滞.

类似于文献 [7] 的方法, 我们可以得到如下形式的网络控制系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_0 x(t) + \sum\limits_{i=1}^{3} A_i x(t - \tau_i(t)) + \tilde{B}_f f(x(t)) + G\omega(t), \\ y(t) = Cx(t) + E\omega(t), \\ x(t) = \phi(t) \quad t \in [-\bar{\tau}, 0], \end{cases} \tag{2.6}$$

其中

$$x(t)=\left[\begin{array}{cc} x_p^T(t) & x_c^T(t) \end{array}\right]^T,\omega(t)=\left[\begin{array}{cc} \omega_p^T(t) & \omega_c^T(t) \end{array}\right]^T,$$
$$A_0=\left[\begin{array}{cc} A_p & 0 \\ 0 & A_c \end{array}\right],A_1=\left[\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ B_cC_p & 0 \end{array}\right],A_2=\left[\begin{array}{cc} B_pD_cC_p & 0 \\ 0 & 0 \end{array}\right],A_3=\left[\begin{array}{cc} 0 & B_pC_c \\ 0 & 0 \end{array}\right],$$
$$C=\left[\begin{array}{cc} C_p & 0 \\ 0 & 0 \end{array}\right],G=\left[\begin{array}{cc} G_p & 0 \\ 0 & G_c \end{array}\right],\tilde{B}_f=\left[\begin{array}{cc} B_f & 0 \\ 0 & 0 \end{array}\right],E=\left[\begin{array}{cc} E_p & 0 \\ 0 & 0 \end{array}\right].$$

网络控制系统中的时变时滞满足

$$\begin{cases} 0\le\tau_1(t)=\tau_{sc}(t)\le\bar{\tau}_1, \\ 0\le\tau_2(t)=\tau_{sc}(t)+\tau_{ca}(t)+\tau_c(t)\le\bar{\tau}_2, \\ 0\le\tau_3(t)=\tau_{ca}(t)+\tau_c(t)\le\bar{\tau}_3. \end{cases}$$

令 $\bar{\tau}=\max\{\bar{\tau}_1,\bar{\tau}_2,\bar{\tau}_3\}$.

为了后续讨论, 我们首先给出如下定义及引理.

定义 2.1 [10] 对于闭环系统 (2.6), 如果对于任意的 $T>0$, 不等式

$$\int_0^T \omega^T(t)y(t)dt\ge 0,\forall T>0, \tag{2.7}$$

对于任意的外部干扰输入 $\omega(t)\in R^p$ 都成立, 则称系统 (2.6) 无源. 特别地, 若存在 $\eta>0$ 使得

$$\int_0^T [\omega^T(t)y(t)-\eta\omega^T(t)\omega(t)]dt\ge 0,\forall T>0. \tag{2.8}$$

对所有零初始条件 $\omega(t)\in R^p$ 的轨迹以及任意的外部干扰输入都成立, 则称系统 (2.6) 是严格无源的.

引理 2.2 [11] 对给定的对称矩阵 $S=\left[\begin{array}{cc} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{array}\right]$, 则以下三个命题等价:

(1) $S<0$,

(2) $S_{22}-S_{21}S_{11}^{-1}S_{12}<0$,

(3) $S_{11}-S_{12}S_{22}^{-1}S_{12}<0$.

在本文中, 我们主要针对如下两种形式的时滞进行无源性分析:

情形 1 时滞是常数 τ_1,τ_2,τ_3;

情形 2 时滞 $\tau_i(t)$ 是时变时滞, 且可导, 并满足:

$$0\le\tau_i(t)\le\bar{\tau}_i,\quad 0\le\dot{\tau}_i(t)\le\mu_i<1. \tag{2.9}$$

其中是 $\tau_i,\bar{\tau}_i,\mu_i,i=1,2,3$ 非负常数, 令 $\bar{\tau}=\max\{\bar{\tau}_1,\bar{\tau}_2,\bar{\tau}_3\}$.

3 主要结论

3.1 时滞无关的无源性分析

定理 3.1 对于给定的常数 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \eta$, 若存在对称的正定矩阵使 P, Q_i 得有如下线性矩阵不等式（LMI）成立:

$$\begin{bmatrix} \Sigma & PA_1 & PA_2 & PA_3 & P\tilde{B}_f & PG-C^T \\ * & -Q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -Q_2 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -Q_3 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\kappa I & 0 \\ * & * & * & * & * & 2\eta I - E - E^T \end{bmatrix} < 0, \tag{3.1}$$

其中 $\Sigma = PA^T{}_0 + PA_0 + \kappa\alpha^2 + \sum\limits_{i=1}^{3} Q_i$, 则系统 (2.6) 是严格无源的.

证 构造如下的 Lyapunov-Krasovskii 泛函:

$$V(t) = \tfrac{1}{2}[x(t)Px(t) + \sum_{i=1}^{3}\int_{t-\tau_i}^{t} x^T(s)Q_ix(s)ds]. \tag{3.2}$$

对 Lyapunov-Krasovskii 泛函沿 (2.6) 式求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \tfrac{1}{2}[\dot{x}^T(t)Px(t) + x^T(t)P\dot{x}(t) + \sum_{i=1}^{3}x^T(t)Q_ix(t) - \sum_{i=1}^{3}x^T(t-\tau_i)Q_ix(t-\tau_i) \\ &= [A_0x(t) + \sum_{i=1}^{3}A_ix(t-\tau_i) + \tilde{B}_f f(x(t)) + G\omega(t)]^T Px(t) \\ &\quad + x^T(t)P[A_0x(t) + \sum_{i=1}^{3}A_ix(t-\tau_i) + \tilde{B}_f f(x(t)) + G\omega(t)] \\ &\quad + \sum_{i=1}^{3}x^T(t)Q_ix(t) - \sum_{i=1}^{3}x^T(t-\tau_i)Q_ix(t-\tau_i)]. \end{aligned}$$

由 (2.3) 式可得

$$\begin{aligned} &\dot{V}(t) - \omega^T(t)y(t) + \eta\omega^T(t)\omega(t) \\ \le\ &\tfrac{1}{2}\{[A_0x(t) + \sum_{i=1}^{3}A_ix(t-\tau_i) + \tilde{B}_f f(x(t)) + G\omega(t)]^T Px(t) \\ &+ x^T(t)P[A_0x(t) + \sum_{i=1}^{3}A_ix(t-\tau_i) + \tilde{B}_f f(x(t)) + G\omega(t)] \\ &+ \sum_{i=1}^{3}x^T(t)Q_ix(t) - \sum_{i=1}^{3}x^T(t-\tau_i)Q_ix(t-\tau_i) \\ &-2\omega^T(t)Cx(t) - 2\omega^T(t)E\omega(t) + 2\eta\omega^T(t)\omega(t)\} + \tfrac{1}{2}[\kappa(\alpha^2x^T(t)x(t) - f^T(x(t))f(x(t))] \end{aligned}$$

$$= \ \frac{1}{2}\xi^T(t)\begin{bmatrix} \Sigma & PA_1 & PA_2 & PA_3 & P\tilde{B}_f & PG-C^T \\ * & -Q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -Q_2 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -Q_3 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\kappa I & 0 \\ * & * & * & * & * & 2\eta I-E-E^T \end{bmatrix}\xi(t),$$

其中 $\xi^T(t) = [\ x^T(t) \quad x^T(t-\tau_1(t)) \quad x^T(t-\tau_2(t)) \quad x^T(t-\tau_3(t)) \quad f^T(x(t)) \quad \omega^T(t)\ ]$. 则由 (3.1) 式可得 $\dot{V}(t) - y^T(t)\omega + \eta y^T(t)y(t) < 0$ 成立, 由定义 2.1 可得系统 (2.6) 是严格无源的.

3.2 时滞相关的无源性分析

定理 3.2 对于给定的常数 $\bar{\tau}, \mu_1, \mu_2, \mu_3, \eta$, 若存在对称的正定矩阵 P, Z_i, Q_i 使得有如下线性矩阵不等式（LMI）成立

$$\begin{bmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{12} \\ {\Psi^T}_{12} & \Psi_{22} \end{bmatrix} < 0, \tag{3.3}$$

其中

$$\Psi_{11} = PA_0 + A_0^T P + \kappa\alpha^2 + \sum_{i=1}^{3}(Q_i + \bar{\tau}A_0^T Z_i A_0),$$

$$\Psi_{12} = [\ J_1 \quad J_2 \quad J_3 \quad J_4 \quad J_5\ ],$$

$$\Psi_{22} = \begin{bmatrix} W_1 & \sum\limits_{i=1}^{3} A_1^T Z_i A_2 & \sum\limits_{i=1}^{3} A_1^T Z_i A_3 & \sum\limits_{i=1}^{3} A_1^T Z_i \tilde{B}_f & \sum\limits_{i=1}^{3} A_1^T Z_i G \\ * & W_2 & \sum\limits_{i=1}^{3} A_2^T Z_i A_3 & \sum\limits_{i=1}^{3} A_2^T Z_i \tilde{B}_f & \sum\limits_{i=1}^{3} A_2^T Z_i G \\ * & * & W_3 & \sum\limits_{i=1}^{3} A_3^T Z_i \tilde{B}_f & \sum\limits_{i=1}^{3} A_3^T Z_i G \\ * & * & * & W_4 & \sum\limits_{i=1}^{3} \tilde{B}_f^T Z_i G \\ * & * & * & * & W_5 \end{bmatrix},$$

$$J_1 = PA_1 + \sum_{i=1}^{3}\bar{\tau}A_0^T Z_i A_1\ , J_2 = PA_1 + \sum_{i=1}^{3}\bar{\tau}A_0^T Z_i A_2\ , J_3 = PA_1 + \sum_{i=1}^{3}\bar{\tau}A_0^T Z_i A_3\ ,$$

$$J_4 = P\tilde{B}_f + \sum_{i=1}^{3}\bar{\tau}A_0^T Z_i \tilde{B}_f\ , J_5 = PG + \sum_{i=1}^{3}\bar{\tau}A_0^T Z_i G - C^T,$$

$$W_1 = \sum_{i=1}^{3} A_1^T Z_i A_1 - Q_1(1-\mu_1), W_2 = \sum_{i=1}^{3} A_2^T Z_i A_2 - Q_2(1-\mu_2),$$

$$W_3 = \sum_{i=1}^{3} A_3^T Z_i A_3 - Q_3(1-\mu_3), W_4 = \sum_{i=1}^{3} \tilde{B}_f^T Z_i \tilde{B}_f - \kappa I,$$

$$W_5 = \sum_{i=1}^{3} G^T Z_i G + 2\eta I - E - E^T.$$

则系统 (2.6) 对于任意的时变时滞都是严格无源的.

证 构造如下的 Lyapunov-Krasovskii 泛函

$$V(t) = \tfrac{1}{2}[V_1(t) + V_2(t) + V_3(t)], \tag{3.4}$$

其中

$$V_1(t)=x^T(t)Px(t), V_2(t)=\sum_{i=1}^{3}\int_{-\tau_i(t)}^{0}\int_{t+\beta}^{t}\dot{x}^T(\alpha)Z_i\dot{x}(\alpha)d\alpha d\beta,$$
$$V_3(t)=\sum_{i=1}^{3}\int_{t-\tau_i(t)}^{t}x^T(\alpha)Q_ix(\alpha)d\alpha.$$

对 Lyapunov-Krasovskii 泛函沿 (2.6) 式求导可得

$$\begin{aligned}\dot{V}_1(t) &= \dot{x}^T(t)Px(t)+x^T(t)P\dot{x}(t)=[A_0x(t)+\sum_{i=1}^{3}A_ix(t-\tau_i(t))+\tilde{B}_ff(x(t))\\&\quad+G\omega(t)]^TPx(t)+x^T(t)P[A_0x(t)+\sum_{i=1}^{3}A_ix(t-\tau_i(t))+\tilde{B}_ff(x(t))+G\omega(t)],\\ \dot{V}_2(t) &\le \sum_{i=1}^{3}\bar{\tau}[A_0x(t)+\sum_{i=1}^{3}A_ix(t-\tau_i(t))+\tilde{B}_ff(x(t))+G\omega(t)]^TZ_i[A_0x(t)\\&\quad+\sum_{i=1}^{3}A_ix(t-\tau_i(t))+\tilde{B}_ff(x(t))+G\omega(t)]],\\ \dot{V}_3(t) &= \sum_{i=1}^{3}x^T(t)Q_ix(t)-\sum_{i=1}^{3}x^T(t-\tau_i(t))Q_ix(t-\tau_i(t))(1-\dot{\tau}_i(t))\\ &\le \sum_{i=1}^{3}x^T(t)Q_ix(t)-\sum_{i=1}^{3}x^T(t-\tau_i(t))Q_ix(t-\tau_i(t))(1-\mu_i),\end{aligned}$$

则由 (2.3) 式可得

$$\begin{aligned}&\dot{V}(t)-\omega^T(t)y(t)+\eta\omega^T(t)\omega(t)\le \tfrac{1}{2}\{[A_0x(t)+\sum_{i=1}^{3}A_ix(t-\tau_i(t))+\tilde{B}_ff(x(t))\\&+G\omega(t)]^TPx(t)+x^T(t)P[A_0x(t)+\sum_{i=1}^{3}A_ix(t-\tau_i(t))+\tilde{B}_ff(x(t))+G\omega(t)]\\&+\sum_{i=1}^{3}\bar{\tau}[A_0x(t)+\sum_{i=1}^{3}A_ix(t-\tau_i(t))+\tilde{B}_ff(x(t))+G\omega(t)]^TZ_i[A_0x(t)+\sum_{i=1}^{3}A_ix(t-\tau_i(t))\\&+\tilde{B}_ff(x(t))+G\omega(t)]+\sum_{i=1}^{3}x^T(t)Q_ix(t)-\sum_{i=1}^{3}x^T(t-\tau_i(t))Q_ix(t-\tau_i(t))(1-\mu_i)\\&-2\omega^T(t)Cx(t)-2\omega^T(t)E\omega(t)+2\eta\omega^T(t)\omega(t)\}+\tfrac{1}{2}[\kappa(\alpha^2x^T(t)x(t)-f^T(x(t))f(x(t))]\\ \le\ &\tfrac{1}{2}\xi^T(t)\begin{bmatrix}\Psi_{11} & \Psi_{12}\\ \Psi^T{}_{12} & \Psi_{22}\end{bmatrix}\xi(t),\end{aligned}$$

其中 $\xi^T(t)=[\ x^T(t)\quad x^T(t-\tau_1(t))\quad x^T(t-\tau_2(t))\quad x^T(t-\tau_3(t))\quad f^T(x(t))\quad \omega^T(t)\ ]$. 由 (3.3) 式可得 $\dot{V}(t)-y^T(t)\omega+\eta y^T(t)y(t)<0$ 成立, 因此系统 (2.6) 对于任意的时变时滞都是严格无源的.

若取 $\eta=0$, 我们可不加证明的得到如下推论:

推论 3.3 对于给定的常数 $\bar{\tau},\mu_1,\mu_2,\mu_3$, 如果存在对称的正定矩阵 P,Z_i,Q_i 使得有如下线性矩阵不等式（LMI）成立

$$\begin{bmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} \\ {\Theta^T}_{12} & \Theta_{22} \end{bmatrix}<0, \tag{3.5}$$

其中 $\Theta_{11}=PA_0+A_0^TP+\kappa\alpha^2+\sum\limits_{i=1}^{3}(Q_i+\bar{\tau}A_0^TZ_iA_0),\Theta_{12}=\Psi_{12},\Theta_{22}=\Psi_{22}$. 则系统 (2.6) 式对于任意的时变时滞都无源.

4 数值仿真

考虑系统 (2.6), 给定系统各参数矩阵如下:

$$A_p=\begin{bmatrix} -5 & 1 \\ 2 & -6 \end{bmatrix},B_p=\begin{bmatrix} 1 & -2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix},G_p=\begin{bmatrix} 2 & 6 \\ 3 & -1 \end{bmatrix},B_f=\begin{bmatrix} -2 & 1.8 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$
$$C_p=\begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix},E_p=\begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix},A_c=\begin{bmatrix} -4 & -1 \\ 2 & -5 \end{bmatrix},B_c=\begin{bmatrix} 0.2 & -0.1 \\ 0.1 & 0.3 \end{bmatrix},$$
$$G_c=\begin{bmatrix} 1 & 5 \\ 3 & -2 \end{bmatrix},C_c=\begin{bmatrix} -1.72 & 0.76 \\ -0.16 & 1.08 \end{bmatrix},D_c=\begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},f=\begin{bmatrix} e^{-0.1t}\sin 0.5x_1x_2 \\ \cos(0.5(x_1+x_2)) \end{bmatrix},$$
$$\tau_1(t)=0.5\sin t\le 0.5=\bar{\tau}_1,\dot{\tau}_1\le 0.5=\mu_1,\tau_2(t)=0.2\cos t+0.3\le 0.5=\bar{\tau}_2,\dot{\tau}_2\le 0.2=\mu_2,$$
$$\tau_3(t)=0.4\sin t+0.2\le 0.6=\bar{\tau}_3\dot{\tau}_3\le 0.4=\mu_3,\bar{\tau}=0.6.$$

利用 Matlab 中的 LMI 工具箱, 由推论 3.3 计算可得线性矩阵不等式有可行解

$$P=\begin{pmatrix} 3.9187 & -0.9029 & 0.0612 & -0.1985 \\ -0.9029 & 0.8686 & 0.1674 & 0.7652 \\ 0.0612 & 0.1674 & 3.5418 & -0.5896 \\ -0.1985 & 0.7652 & -0.5896 & 3.9627 \end{pmatrix},$$
$$Q_1=\begin{pmatrix} 3.9067 & -1.0305 & 0.0442 & -0.0634 \\ -1.0305 & 2.3763 & 0.0431 & 0.4046 \\ 0.0442 & 0.0431 & 3.1217 & -0.9596 \\ -0.0634 & 0.4046 & -0.9596 & 0.2152 \end{pmatrix},$$
$$Q_2=\begin{pmatrix} 7.3990 & -1.2263 & 0.1175 & -0.1227 \\ -1.2263 & 4.9048 & 0.1222 & 0.5783 \\ 0.1175 & 0.1222 & 5.6348 & -1.5247 \\ -0.1227 & 0.5783 & -1.5247 & 7.3294 \end{pmatrix},$$
$$Q_3=\begin{pmatrix} 4.6911 & -1.1061 & 0.0580 & -0.0760 \\ -1.1061 & 2.9425 & 0.0581 & 0.4505 \\ 0.0580 & 0.0581 & 3.7126 & -1.0949 \\ -0.0760 & 0.4505 & -1.0949 & 4.9524 \end{pmatrix}.$$

图 2– 图 3 分别给出了网络控制系统中网络控制对象与时滞控制器的状态轨迹曲线, 从图中我们可以看到系统是稳定的. 图 4 给出了网络控制对象的输出轨迹, 而从图 5 中我们可以看到网络控制系统的性能指标 $\int_0^T \omega^T(t)y(t)dt \geq 0, \forall T > 0$ 满足, 即系统是无源的.

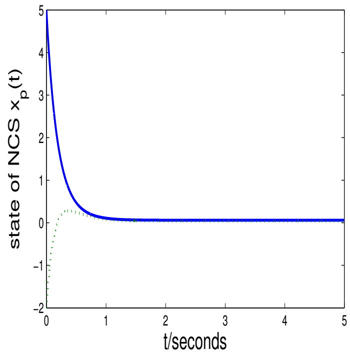

图 2: 网络控制对象的状态轨迹

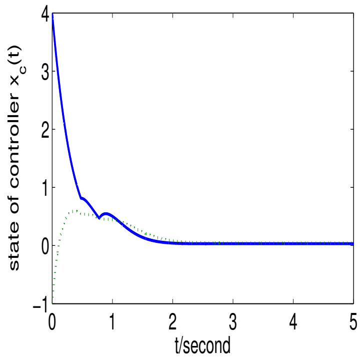

图 3: 时滞控制器的状态轨迹

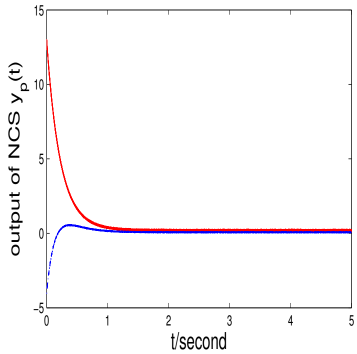

图 4: 网络控制对象的输出曲线

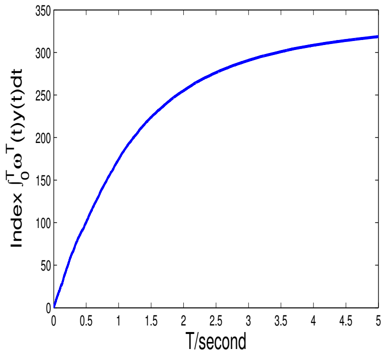

图 5: 无源性性能指标随时间变化情况

5 结论

本文对一类非线性时滞网络控制系统的无源性问题进行了分析, 通过构造 Lyapunov-Krasovskii 泛函, 在考虑两种不同时滞的情况下, 以线性矩阵不等式 (LMI) 的形式分别给出了系统满足无源性的时滞无关与时滞相关充分条件, 最后通过仿真算例验证了结论的正确性和方法的有效性. 基于本文结论, 进一步可以讨论网络控制系统其它更多的性质, 并为网络控制系统设计相应的无源控制器等.

参 考 文 献

[1] Zhang W, Michael S Branicky, Stepen M Philips. Stability of networked control systems [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21 (2): 84–99.

[2] 曾蓉. 基于无源性理论的状态反馈控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学自动化学院, 2009.

[3] 张秀华, 张庆灵. 线性广义系统的无源控制 [J]. 控制与决策, 2006, 21 (1): 81–83.

[4] 孙海义, 李宁. 一类长时延网络控制系统的鲁棒无源控制 [J]. 计算技术与自动化, 2007, 26 (4): 5–8.
[5] 李宁, 孙海义, 赵津津. 一类长时延网络控制系统的无源控制 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2007, 23 (6): 1044–1048.
[6] 李桂芳, 刘星, 马艳琴, 杨成梧. 一类非线性系统的鲁棒无源综合问题 [J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30 (10): 1938–1943.
[7] Gao Jinfeng, Su Hongye, Chu Jian. Robust stability analysis of networked control systems [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2009, 7 (3): 301–306.
[8] 董心壮, 张庆灵, 郭凯. 离散广义系统的无源控制 [J]. 东北大学学报, 2003, 24 (4): 342–344.
[9] 龚文振. 具有时变时滞的不确定离散广义系统的稳定与镇定 [J]. 数学杂志, 2013, 33 (2): 237–247.
[10] 董心壮, 张庆灵. 时变不确定广义系统的鲁棒无源控制 [J]. 控制理论与应用, 2004, 21 (4): 517–520.
[11] 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.

PASSIVE ANALYSIS FOR A CLASS OF NETWORK CONTROL SYSTEM WITH TIME-VARYING DELAY AND NONLINEAR PERTURBATION

LIU Yun-bing , ZHAO Yun-feng ,CHEN Gui-ci

(*School of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081,China*)

Abstract: In this paper, we investigate the passivity problem for a class of network control system with time-varying delays and nonlinear perturbations. Using the Lyapunov stability theory, together with the linear matrix inequality(LMI) technique, the sufficient conditions of passivity for the nonlinear network control system with time-varying delays, which two different cases of time delays are taken into account, are given. Finally, a numerical example with simulations shows the correction of the results and the effectiveness of the proposed method.

Keywords: network control system; time-varying delay; LMI; passive analysis

2010 MR Subject Classification: 93C10