文章编号: 1001-0920(2006)09-1001-05

一类仿射非线性网络控制系统的稳定性分析

马 丹[a,b], 赵 军[b]
(东北大学 a. 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室, b. 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘 要: 利用采样数字控制系统的方法分析了一类混杂动态系统模型描述的仿射非线性网络控制系统的稳定性问题. 针对一类仿射非线性对象和线性数字控制器组成的网络控制系统, 考虑了网络诱导延时对系统稳定性的影响, 得到了仿射非线性网络控制系统一致渐近稳定的条件. 仿真实例验证了理论分析的正确性.

关键词: 仿射非线性网络控制系统; 网络诱导延时; 混杂动态系统; 采样; 一致渐近稳定
中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Stability Analysis for a Class of Affine Nonlinear Networked Control Systems

MA Dan[a,b], *ZHAO Jun*[b]
(a. Key Laboratory of Process Industry Automation of Ministry of Education, b. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: MA Dan, E-mail: madan1900@126.com)

Abstract: A sampled-data control system approach is presented to a class of affine nonlinear networked control systems described by a hybrid dynamic system model. The networked control system of this class is composed of an affine nonlinear plant and a linear digital controller. The effect of network-induced delay to the stability of affine nonlinear networked control systems is considered. Conditions for stability of affine nonlinear networked control systems are presented. Simulation results show the feasibility and efficiency of the proposed methods.

Key words: Affine nonlinear networked control systems; Network-induced delay; Hybrid dynamic systems; Sampling; Consistent asymptotical stability

1 引 言

通过实时网络构成闭环的反馈控制系统称为网络控制系统(networked control systems)[1~8], 如图1所示. 这种分布式的结构减少了连线, 降低了成本, 广泛应用于汽车工业、机器人遥操作和自动化生产系统中. 然而, 有限网络带宽影响了数据及时准确地传输, 从而产生网络诱导延时[2], 其特性依赖于网络类型和硬件选择, 或为常数或为时变的, 都会降低系统性能, 甚至减小系统稳定域, 使系统不可镇定[6].

对网络控制系统的研究集中于线性网络控制系统的稳定性与镇定问题[2, 4~8], 非线性网络控制系统的研究相对较少, 而非线性是本质的、普遍的, 线性

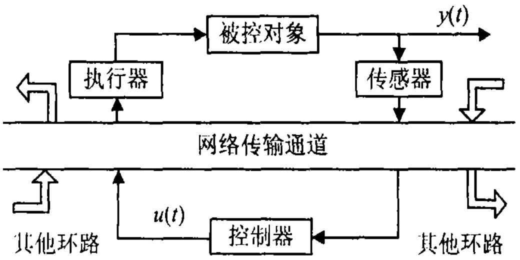

图1 网络控制系统结构

收稿日期: 2005-07-21; 修回日期: 2005-09-27.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60274009, 60574013).
作者简介: 马丹(1977—), 女, 辽宁新民人, 博士生, 从事网络控制系统的研究; 赵军(1957—), 男, 辽宁海城人, 教授, 博士生导师, 从事复杂非线性系统、切换控制等研究.

只是非线性在特定条件下的一种特殊表现形式[9]. 目前, 文献[1, 3]考虑了非线性网络控制系统的情况; [1]建立了网络控制系统的连续模型, 将网络诱导延时表示为误差状态向量, 再将误差考虑为原对象的摄动, 给出了闭环系统稳定条件; [6]研究了一类具有一致全局指数稳定协议的非线性系统的 L_p 稳定性

本文利用文献[2] 的思想建立了仿射非线性网络控制系统的混杂模型, 用采样数字控制系统理论分析了网络控制系统稳定性 研究的是非线性对象和线性数字控制器组成的混杂动态系统, 考虑了网络传输延时, 得到了仿射非线性网络控制系统稳定性的充分条件

2 系统描述

在每一次采样信号的传输延时 τ_k 小于一个采样周期 h 的情况下, 仿射非线性网络控制系统为

$$\begin{aligned}&\dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t),\\ &t \in [kh + \tau_k, (k+1)h + \tau_{k+1}),\\ &u(t^+) = -Kx(t - \tau_k),\\ &t \in \{kh + \tau_k, k = 0, 1, \cdots\}.\end{aligned} \tag{1}$$

其中: $x(t) \in R^n, u(t) \in R^m, y(t) \in R^p$; K 为适当维数的实数矩阵; $f(x): R^n \to R^n$ 是连续可微的, 且 $f(0) = 0$; $g(x) \in R^{n\times m}$, 且 $g(0) \neq 0$; 下标表示采样时刻, h 为常数采样周期; $u(t^+)$ 是经零阶保持器的控制输入, 为分段常值连续信号, 其值在 $kh + \tau_k$ 时刻改变 这里, 网络传输延时存在于传感器与控制器、控制器与执行器之间, 分别记为 $\tau_{sc,k}$, $\tau_{ca,k}$, 对于时不变的控制器, 不失一般性传输延时 $\tau_k = \tau_{sc,k} + \tau_{ca,k}$, 而控制器的计算延时可以归结到 $\tau_{ca,k}$ 中[2]. 传感器采用时间驱动, 控制器和执行器采用事件驱动的触发方式[2].

对式(1) 所描述的非线性网络控制系统的研究目前还较少见到, 本文推导出的稳定性结果是建立在线性网络控制系统稳定性基础上的

线性网络控制系统描述[2] 为

$$\begin{aligned}&\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t),\\ &t \in [kh + \tau_k, (k+1)h + \tau_{k+1}),\\ &u(t^+) = -Kx(t - \tau_k),\\ &t \in \{kh + \tau_k, k = 0, 1, \cdots\}.\end{aligned} \tag{2}$$

其中: $x(t) \in R^n, u(t) \in R^m, y(t) \in R^p$; A, B, K 为适当维数的实数矩阵; $u(t^+)$ 特性同系统(1) 的描述; $A \in R^{n\times n}$ 表示 $f(x)$ 在 $x = 0$ 点的Jacobia 矩阵, 即

$$A = \left[\frac{\partial f}{\partial x}(0)\right]_{n\times n}; \tag{3}$$

$B \in R^{n\times m}$ 表示 $g(x)$ 在点 $x = 0$ 的值, 即

$$B = g(0). \tag{4}$$

对于系统(2) 已有如下结果[2, 4]:

引理 1 对于具有常数延时的线性网络控制系统在平衡点 $(x^T, u^T)^T = (0^T, 0^T)^T$ 处是指数稳定的, 当且仅当矩阵

$$H = \begin{bmatrix}\Phi - \Gamma_0(\tau_k)K & \Gamma_1(\tau_k)\\ -K & 0\end{bmatrix} \tag{5}$$

是 Schur 稳定的(即矩阵 H 在复平面上的所有特征值都在单位圆内), 其中

$$\Phi = e^{Ah},$$

$$\Gamma_0(\tau_k) = \int^{\tau_k} e^{As}B\,ds,$$

$$\Gamma_1(\tau_k) = \int_{-\tau_k} e^{As}B\,ds$$

3 主要结果

定理 1 如果线性网络控制系统(2) 在平衡点 $(x^T, u^T)^T = (0^T, 0^T)^T$ 处是指数稳定的(等同于矩阵 H 是 Schur 稳定的), 那么非线性网络控制系统(1) 在平衡点 $(x^T, u^T)^T = (0^T, 0^T)^T$ 处是一致渐近稳定的

证明 由于 $f \in C^1[R^n, R^n]$(即 $f: R^n \to R^n$, 且 f 是连续可微的), $f(0) = 0$, 所以 f 可写成如下形式:

$$f(x) = Ax + f_1(x). \tag{6}$$

其中: $A \in R^{n\times n}, A = \left[\frac{\partial f}{\partial x}(0)\right]_{n\times n}, f_1(x) \in C^1[R^n, R^n]$ 并满足条件

$$\lim_{x\to 0}\frac{\| f_1(x)\|}{\| x\|} = 0. \tag{7}$$

因为 $g \in R^{n\times m}$, $g(0) \neq 0$, 则 $g(x)$ 可写为

$$g(x) = B + g_1(x), \tag{8}$$

其中: $g(0) = B, B \in R^{n\times m}, g_1(x) \in R^{n\times m}$, 且有

$$\| g_1(x)\| < \gamma \| x\|, \tag{9}$$

$\|\cdot\|$ 表示 R^n 空间上的Euclidean 范数, γ 为非负常数, 则系统(1) 可写成如下形式:

$$\begin{aligned}&\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) +\\ &\qquad f_1(x) + g_1(x)u(t),\\ &t \in [kh + \tau_k, (k+1)h + \tau_{k+1}),\\ &u(t^+) = -Kx(t - \tau_k),\\ &t \in \{kh + \tau_k, k = 0, 1, \cdots\}.\end{aligned} \tag{10}$$

对于 $t \in [kh, kh + h]$, 式(10) 的解为

$$\begin{aligned}&x(t) =\\ &e^{A(t-kh)}x(kh) + \int_{kh} e^{A(t-s)}Bu(s)ds +\\ &\int_{kh} e^{A(t-s)}[f_1(x(s)) + g_1(x(s))u(s)]ds\end{aligned} \tag{11}$$

当 $\tau_k < h$ 时, 特别地对 $t = kh + h$ 有

$$x(kh+h) = e^{Ah}x(kh) + \int_0^{\tau_k} e^{As}\mathrm{d}s B u(kh) + \int_{h-\tau_k}^{h} e^{As}B\,\mathrm{d}s u(kh-h) + \int_{kh}^{kh+h} e^{A((kh+h)-s)}[f_1(x(s)) + g_1(x(s))u(s)]\mathrm{d}s. \tag{12}$$

令 $w(kh) = \begin{bmatrix} x(kh) \\ u(kh-h) \end{bmatrix}$, 有

$$w(kh+h) = Hw(kh) + \begin{bmatrix} \Delta(kh) \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{13}$$

其中

$$\Delta(kh) = \int_{kh}^{kh+h} e^{A((kh+h)-s)}[f_1(x(s)) + g_1(x(s))u(s)]\mathrm{d}s,$$

H 如式(5) 所示.

假设 H 是 Schur 稳定的, 则存在一个正定对称的矩阵 P, 满足 $H^{\mathrm{T}}PH - P = -I$, 其中, $I \in R^{(n+m)\times(n+m)}$ 表示单位阵. 定义如下形式的 Lyapunov 函数:

$$V(w) = w^{\mathrm{T}}Pw, \tag{14}$$

其中

$$w \in R^{n+m},$$
$$w(kh) = [x^{\mathrm{T}}(kh), u^{\mathrm{T}}(kh-h)]^{\mathrm{T}},$$
$$\Omega(kh) = [\Delta^{\mathrm{T}}(kh), 0^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}},$$

则式(12) 写成

$$w(kh+h) = Hw(kh) + \Omega(kh). \tag{15}$$

式(14) 的前向微分沿方程(15) 的解为

$$\Delta V(w) = V(w(kh+h)) - V(w(kh)) \leqslant -\|w(kh)\|^2 + \|\Delta(kh)\|^2\|P\| + 2\|\Delta(kh)\|\|PH\|\|w(kh)\|. \tag{16}$$

在进一步推导之前, 给出如下引理:

引理 2 　对于给定的 $\mu > 0$, 总存在一个 $\delta_0 = \delta_0(\mu) > 0$, 使得当 $\|w(kh)\| < \delta_0(k \in Z^+ = \{0, 1, \cdots\})$ 时, 总有

$$\|\Delta(kh)\| \leqslant \int_{kh}^{kh+h} e^{\|A\|h}\|G(x(s))\|\mathrm{d}s < \mu\|w(kh)\| \tag{17}$$

成立. 其中

$$G(x(s)) = f_1(x(s)) + g_1(x(s))u(s). \tag{18}$$

证明 　由式(7) 可得, 存在一个 $\delta_{11} > 0$, 当 $\|x\| < \delta_{11}$ 时, 总有 $\|f(x)\| \leqslant \|x\|$. 对于任意的 $t \in [kh, kh+h]$, 式(10) 的解为

$$x(t) = x(kh) + \int_{kh}^{t}[Ax(s) + Bu(s) + f_1(x(s)) + g_1(x(s))u(s)]\mathrm{d}s. \tag{19}$$

由于网络传输延时的存在, 且 $\tau_k < h$, 在一个采样周期之内, 控制信号是分段常值的, 当 $t \in [kh, kh+\tau_k]$ 时, 取 $u(t) = u(kh-h)$; 当 $t \in [kh+\tau_k, kh+h]$ 时, 取 $u(k) = u(kh)$. 所以对于方程(19) 的解的估计问题将从以下两方面来考虑:

1) 当 $t \in [kh, kh+\tau_k]$ 时,

$$x(t) = x(kh) + \int_{kh}^{t}[Ax(s) + Bu(kh-h) + f_1(x(s)) + g_1(x(s))u(kh-h)]\mathrm{d}s. \tag{20}$$

由 Gronwall 不等式有

$$\|x(t)\| \leqslant \|x(kh)\| + (t-kh)\|B\|\|u(kh-h)\| + \int_{kh}^{t}[\|A\|\|x(s)\| + \|f_1(x(s))\| + \|g_1(x(s))\|\|u(kh-h)\|]\mathrm{d}s \leqslant \sqrt{1+\tau_k^2e^{2\gamma\tau_k}\|B\|^2}\|\omega(kh)\| + \int_{kh}^{t}(\|A\|+1)\|x(s)\|\mathrm{d}s \leqslant \sqrt{1+\tau_k^2e^{2\gamma\tau_k}\|B\|^2}\|\omega(kh)\|e^{(\|A\|+1)\tau_k}. \tag{21}$$

当采样周期 h 为常数时, 令

$$\delta_{21} = \frac{e^{-(\|A\|+1)\tau_k}}{\sqrt{1+\tau_k^2e^{2\gamma\tau_k}\|B\|^2}}\delta_{11},$$

则对于 $t \in [kh, kh+h]$, 只要 $\|\omega(kh)\| \leqslant \delta_{21}$, 总有 $\|x(t)\| \leqslant \delta_{11}$. 当给定的 $\mu_{s1} > 0$, 选择 $\mu_{11} > 0$, $\gamma > 0$ 使得

$$\mu_{s1} = e^{h\|A\|}\gamma\delta_{31}\sqrt{\tau_k^2 + (h-\tau_k)^2\|K\|^2} + h\mu_{11}e^{h\|A\|}e^{(\|A\|+1)\tau_k}\sqrt{1+\tau_k^2e^{2\gamma\tau_k}\|B\|^2},$$

因此存在一个 $\delta_{31} > 0$, 当 $\|x\| < \delta_{31}$ 时, 使得 $\|f_1(x)\| < \mu_{11}\|x\|$, 令

$$\delta_{01} = \min\left\{\delta_{11}, \frac{\delta_{31}}{\sqrt{1+\tau_k^2e^{2\gamma\tau_k}\|B\|^2}e^{(\|A+1\|)\tau_k}}\right\},$$

当 $\|\omega(kh)\| \leqslant \delta_{01}$ 时, 对所有的 $t \in [kh, kh+h]$ 有

$$\|x(t)\| \leqslant \delta_{01}\sqrt{1+\tau_k^2e^{2\gamma\tau_k}\|B\|^2}e^{(\|A\|+1)\tau_k} \leqslant \delta_{31}. \tag{22}$$

对于式(17) 给出的 $\Delta(kh)$, 通过系统(13) 解的界来估计, 可得

$$\|\Delta(kh)\| \leqslant e^{h\|A\|}\left[\int_{kh}^{kh+\tau_k}\gamma\|x(s)\|\mathrm{d}s\|u(kh-h)\| + \right.$$

$$\int_{kh+\tau_k}^{kh+h}\gamma\|x(s)\|\mathrm{d}s\|u(kh)\| + \int_{kh}^{kh+h}\mu_{11}\|x(s)\|\mathrm{d}s\Big] \le \mathrm{e}^{h\|A\|}\gamma\delta_{31}\times \sqrt{\tau_k^2+(h-\tau_k)^2\|K\|^2}\,\|\omega(kh)\| + h\mu_{11}\mathrm{e}^{h\|A\|}\mathrm{e}^{(\|A\|+1)\tau_k}\times \sqrt{1+\tau_k^2\mathrm{e}^{2\gamma\tau_k}\|B\|^2}\,\|\omega(kh)\| = \mu_{s1}\|\omega(kh)\|. \tag{23}$$

2) 当 $t\in[kh+\tau_k, kh+h]$ 时,

$$x(t) = x(kh) + \int_{kh}^{kh+\tau_k}[Ax(s)+Bu(kh-h)+f_1(x(s))+g_1(x(s))u(kh-h)]\mathrm{d}s + \int_{kh+\tau_k}[Ax(s)+Bu(kh)+f_1(x(s))+g_1(x(s))u(kh)]\mathrm{d}s. \tag{24}$$

同理, 由 Gronwall 不等式有

$$\|x(t)\| \le ([1+(h-\tau_k)\|B\|\mathrm{e}^{\gamma(h-\tau_k)}\|K\|]^2 + \tau_k^2\|B\|^2\mathrm{e}^{2\gamma\tau_k})^{\frac{1}{2}}\|\omega(kh)\|\mathrm{e}^{(\|A\|+1)(h-\tau_k)}. \tag{25}$$

令

$$\delta_{22} = \mathrm{e}^{-(\|A\|+1)(h-\tau_k)}\delta_{12}([1+(h-\tau_k)\|B\|\mathrm{e}^{\gamma(h-\tau_k)}\|K\|]^2+\tau_k^2\|B\|^2\mathrm{e}^{2\gamma\tau_k})^{-\frac{1}{2}},$$

则对于 $t\in[kh, kh+h]$, 只要 $\|\omega(kh)\|\le\delta_{22}$, 总有 $\|x(t)\|\le\delta_{12}$. 给定 $\mu_{s2}>0$, 选择 $\mu_{12}>0$, $\gamma>0$ 使得

$$\mu_{s2} = \mathrm{e}^{h\|A\|}\gamma\delta_{32}(\tau_k^2+(h-\tau_k)^2\|K\|)^{\frac{1}{2}} + \mathrm{e}^{h\|A\|}h\mu_{12}\mathrm{e}^{(\|A\|+1)(h-\tau_k)}([1+(h-\tau_k)\|B\|\mathrm{e}^{\gamma(h-\tau_k)}\|K\|]^2+\tau_k^2\|B\|^2\mathrm{e}^{2\gamma\tau_k})^{\frac{1}{2}},$$

因此存在 $\delta_{32}>0$, 当 $\|x\|<\delta_{32}$ 时, 使得 $\|f_1(x)\|<\mu_{12}\|x\|$. 令

$$\delta_{02} = \min\Big\{\delta_{12}, \delta_{32}([1+(h-\tau_k)(\|B\|+\gamma)\|K\|]^2 + \tau_k^2(\|B\|+\gamma)^2)^{-\frac{1}{2}}\mathrm{e}^{-(\|A+1\|)(h-\tau_k)}\Big\},$$

当 $\|\omega(kh)\|\le\delta_{02}$ 时, 对于所有的 $t\in[kh, kh+h]$ 有

$$\|x(t)\| \le \delta_{02}([1+(h-\tau_k)(\|B\|+\gamma)\|K\|]^2 + \tau_k^2(\|B\|+\gamma)^2)^{\frac{1}{2}}\mathrm{e}^{(\|A+1\|)(h-\tau_k)} \le \delta_{32}. \tag{26}$$

同理有

$$\|\Delta(kh)\| \le \mathrm{e}^{h\|A\|}\gamma\delta_{32}(\tau_k^2+(h-\tau_k)^2\|K\|^2)^{\frac{1}{2}}\|\omega(kh)\| + \mathrm{e}^{h\|A\|}h\mu_{12}\mathrm{e}^{(\|A\|+1)(h-\tau_k)}([1+(h-\tau_k)\|B\|\mathrm{e}^{\gamma(h-\tau_k)}\|K\|]^2 + \tau_k^2\|B\|^2\mathrm{e}^{2\gamma\tau_k})^{\frac{1}{2}}\|\omega(kh)\| = \mu_{s2}\|\omega(kh)\|. \tag{27}$$

综合 1) 和 2), 取

$$\delta_1=\min\{\delta_{11},\delta_{12}\},\ \delta_2=\min\{\delta_{21},\delta_{22}\},$$
$$\delta_3=\min\{\delta_{31},\delta_{32}\},\ \delta_0=\min\{\delta_{01},\delta_{02}\},$$

当 $\|w(kh)\|<\delta_0$ 时, 有 $\|x(t)\|<\delta_3$, 取 $\mu=\min\{\mu_{s1},\mu_{s2}\}$, 则有 $\|\Delta(kh)\|<\mu\|w(kh)\|$.

引理 2 得证 □

选择 $\mu_0>0$, 使得 $2\mu_0\|PH\|+\mu_0^2\|P\|<1$, 则有 $\delta_0(\mu_0)>0$, 当 $\|w(kh)\|<\delta_0(\mu_0)$ 时, 有

$$V(w(kh+h)) - V(w(kh)) < -\|w(kh)\|^2 + 2\mu_0\|PH\|\|w(kh)\|^2 + \mu_0^2\|P\|\|w(kh)\|^2 = -\|w(kh)\|^2(1-2\mu_0\|PH\|-\mu_0^2\|P\|). \tag{28}$$

由式(14) 和(28) 可知

$$\lambda_{\min}(P)\|w(kh+h)\|^2 \le V(w(kh+h)) < V(w(kh)) \le \lambda_{\max}(P)\|w(kh)\|^2, \tag{29}$$

其中 $\lambda_{\min}(P)$ 和 $\lambda_{\max}(P)$ 分别表示矩阵 P 的最小和最大特征值. 令

$$d = (\lambda_{\min}(P)/\lambda_{\max}(P))^{1/2}\delta_0(\mu_0), \tag{30}$$

若对于任意的 $k_0\in Z^+$, 有 $\|w(k_0h)\|<d$, 则由式(29) 得 $\|w(k_0h+h)\|<\delta_0(\mu_0)$, 若对于式(28) 取 $k=k_0+1$, 则有

$$V(w((k_0+2)h)) < V(w((k_0+1)h)) < V(w(k_0h)).$$

在式(29) 中, 用 k_0+2 代替 k_0+1, 就有 $\|w((k_0+2)h)\|<\delta_0(\mu_0)$, 依次类推, 对于所有的 $k>k_0$ 有 $\|w(kh)\|<\delta_0(\mu_0)$. 因此, 对于 $\|w(k_0h)\|<d$, 当 $k>k_0$ 时, 式(28) 均成立. 所以, 方程(10) 的解在域 $B_d(0)=\{w\in R^{(n+m)}: \|w\|<d\}$ 上是一致渐近稳定的. 因为 $u(t^+)$ 是分段常值的, 且仅在 $kh+\tau_k(k=0,1,\cdots)$ 时刻改变其值, 所以, 对于 $t\in[kh,(k+1)h)$, 由式(12) 和式(18) 得

$$\|x(t)\| \le \mathrm{e}^{\|A\|h}\|x(kh)\| + h\mathrm{e}^{\|A\|h}\|B\|[\|K\|\|x(kh)\| + \|u(kh-h)\|] + \int_{kh}^{kh+h}\mathrm{e}^{\|A\|h}\|G(x(s))\|\mathrm{d}s \le \mathrm{e}^{\|A\|h}((1+h\|B\|\|K\|)^2 + h^2\|B\|^2)^{\frac{1}{2}}\|w(kh)\| + \mu_0\|w(kh)\| = (\mathrm{e}^{\|A\|h}((1+h\|B\|\|K\|)^2 +$$

$$h^2\|B\|^2)^{\frac{1}{2}}+\mu_0)\|w(kh)\|. \quad (31)$$

在$[kh, kh+h]$上, 只要$\|w(k_0h)\|<d$, $x(t)$都随$w(kh)=[x^{\mathrm{T}}(kh), u^{\mathrm{T}}((k-1)h)]^{\mathrm{T}}$收敛于原点. 所以系统(13)的一致渐近稳定保证了系统(1)的一致渐近稳定. 即如果式(5)给出的系统矩阵是Schur稳定的, 则系统(1)的解是一致渐近稳定的.

综上, 定理1得证. □

注 1 　形如式(1)和(2)所示的系统是既含连续动态又含离散动态的混杂系统, 所以定理1的证明不能直接采用Lyapunov第一法得出的线性化结果.

注 2 　定理1得到的结果是一个局部的结果, 需要估计系统在平衡点处渐近稳定的吸引域.

注 3 　式(1)是仿射非线性网络控制系统的一般形式, 特别地, 当式(10)中的非线性扰动项$f_1(x)$和$g_1(x)$在平衡点处趋于零时, 定理1即是文献[2]中线性网络控制系统的稳定条件.

4　仿真示例

仿射非线性网络控制系统

$$\begin{aligned}&\mathring{x}(t)=\\&x(t)+x^2(t)+(1+x(t)+x^2(t))u(t),\\&t\in[kh+\tau_k,(k+1)h+\tau_{k+1}),\\&u(t^+)=-Kx(t-\tau_k),\\&t\in\{kh+\tau_k,k=0,1,\cdots\}.\end{aligned}$$

线性化为如下形式:

$$\begin{aligned}&\mathring{x}(t)=\\&x(t)+u(t)+(x^2(t)+\\&(x(t)+x^2(t))u(t)),\\&t\in[kh+\tau_k,(k+1)h+\tau_{k+1}),\\&u(t^+)=-Kx(t-\tau_k),\\&t\in\{kh+\tau_k,k=0,1,\cdots\}.\end{aligned}$$

显然

$$\gamma=1, A=\frac{\partial f}{\partial x}(0)=1, g(0)=B=1,$$

$$f_1(x)=x^2, g_1(x)=x(t)+x^2(t), \mu_{11}=1,$$

取$K=2$, 系统初值取$x(0)=1.5$. 定义$w(kh)$形如式(13)所示, 对于采样周期$h=0.2$ s, 在保证H是Schur稳定的前提下, 得到延时满足$0<\tau_k<0.526$ s. 取$\tau_k=0.18$ s, 此时$H=\begin{bmatrix}1.1810 & 0.2012\\ 2 & 0\end{bmatrix}$是Schur稳定的, 则

$$P=\begin{bmatrix}4.2690 & -7.19\\ -7.19 & 18.0759\end{bmatrix},$$

由$2\mu_0\|PH\|+\mu_0^2\|P\|<1$得$\mu_0=0.01024$, 则对于给定的$\mu_0=0.01024=\mu$, 存在$\delta_0(\mu_0)=0.027035$, $d=0.0065$, 使得只要$\|\omega(k_0h)\|\le d$, $x(t)$都随$w(kh)$收敛于原点. 将此系统表述为式(12)所示的形式, 利用Matlab和Simulink软件仿真, 结果如图2所示.

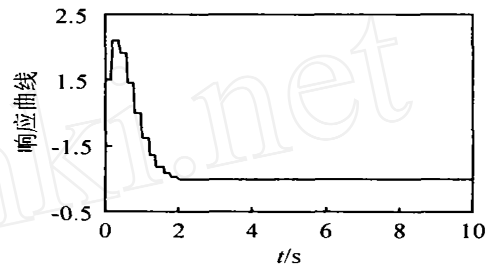

图 2　系统的状态响应曲线

5　结　　语

通过采样数字控制系统的方法, 在线性网络控制系统的指数稳定条件基础上, 得到了仿射非线性网络控制系统一致渐近稳定的充分条件. 研究的是非线性对象和线性数字控制器组成的混杂动态系统, 考虑了网络传输延时, 并通过仿真示例验证了理论分析的正确性. 对于延时大于一个采样周期和时变采样周期的非线性网络控制系统稳定性和镇定问题将在后续的工作中进一步研究.

参考文献(References)

[1] 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.

[2] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of Networked Control Systems [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 84-99.

[3] Nesic D, Teel A R. On L_p Stability of Networked Control Systems [A]. *Proc of 42nd IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Hawaii, 2003: 1188-1193.

[4] Liu Y Z, Yu H B. Stability of Networked Control Systems Based on Switched Technique [A]. *Proc of 42nd IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Hawaii, 2003: 1110-1113.

[5] 杨丽曼, 李运华, 袁海斌. 网络控制系统的时延分析及数据传输技术研究[J]. *控制与决策*, 2004, 19(4): 361-366.
(Yang L M, Li Y H, Yuan H B. Analysis of Time Delay in Networked Control Systems and Study of Data Transmission Technology [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(4): 361-366.)

(下转第1010页)

上就表现为急剧下降, 甚至降为零, 这种可能的突发事件导致企业会选择在很高的临界值进入, 即除非有足够高的价格、足够诱人的市场, 企业才可能冒险进入. 当然也有可能政府最后的标准就是本企业所使用的标准, 这无疑是个可能的有利事件, 但 3G 高额的投入和一旦标准改变所导致的巨大损失是企业决策所要考虑的主要因素.

4 结 语

本文研究了在新技术商业化初期, 面对未来可能出现的不可预测事件时的决策. 在假定企业等待没有成本的基础上, 利用一个简化的模型从理论上给出了决策的模拟数值解. 研究结果表明: 如果未来有不可预期的不利事件发生时, 企业应该在较高的临界价格进入市场, 同时退出的最佳临界价格也应该提高, 该事件发生的可能性越大, 企业进入和退出临界值就越高, 事件的破坏性越大时, 进入和退出的临界值也越大, 但由于受技术折旧的加速投资效应的影响, 在初始投资额较小时, 事件的破坏性 ϕ 对进入临界值有一个先上升后下降的过程; 有利事件的发生则产生相反的效果, 企业进入和退出的临界值都有所降低, 限于本文的产出固定的假设, 当事件的有利程度 ϕ 达到一定值时, 企业会考虑在较高的价格进入. 而当价格处于临界值之间时企业将会等待临界值的到来.

当然, 实际上的决策过程远没有这么简单, 进一步放宽模型的限制如考虑竞争者、加入等待的成本、产出可变和实证研究将是下一步的研究目标.

参考文献(References)

[1] 杨壬飞, 仝允桓. 新技术商业化及其评价的研究综述[J]. *科学学研究*, 2004, 22(增刊): 82-88.
(Yang R F, Tong Y H. Research Review on Commercialization of New Technology and Assessment [J]. *Studies in Science of Science*, 2004, 22(S): 82-88.)

[2] Eduardo S. Schwartz, Carlos Z G. Investment under Uncertainty in Information Technology: Acquisition and Development Projects [J]. *Management Science*, 2003, 49(1): 57-70.

[3] Luis H R Alvarez, Rune Stenbacka. Adoption of Uncertain Multi-stage Technology Projects: A Real Options Approach [J]. *J of Mathematical Economics*, 2001, 35(1): 71-97.

[4] Enrico Scarso. Timing the Adoption of a New Technology: An Option-based Approach [J]. *Management Decision*, 1996, 34(3): 41-48.

[5] Kuno J M Huisman, Peter M Kort. Strategic Technology Adoption Taking into Account Future Technological Improvements: A Real Options Approach [J]. *European J of Operational Research*, 2004, 159(3): 705-728.

[6] Decamps J P, Thomas Mariotti. Investment Timing and Learning Externalities[J]. *J of Economic Theory*, 2004, 118(1): 80-102.

[7] Helen Weeds. Strategic Delay in a Real Options Model of R&D Competition [J]. *Review of Economic Studies*, 2002, 69(3): 729-747.

[8] Dixit A K, Pindyck R S. *Investment under Uncertainty* [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2002: 199-227.

[9] 夏晖, 曾勇, 唐小我. 企业采用新技术的最优时机研究[J]. *系统工程学报*, 2004, 19(6): 607-614.
(Xia H, Zeng Y, Tang X W. Study on Firms' Optimal Adoption Timing of New Technologies [J]. *J of Systems Engineering*, 2004, 19(6): 607-614.)

[10] Tyrone T Lin, Shih T L. Applying Real Options and the Maximum NPV Rule to Market Entry/Exit Strategies [J]. *Asia-Pacific J of Operational Research*, 2005, 22(1): 71-83.

(上接第 1005 页)

[6] Tipsuwan Y, Chow M Y. Control Methodologies in Networked Control Systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(10): 1099-1111.

[7] 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): 1-5.

[8] Hou L, Michel A N, Ye H. Some Qualitative Properties of Sampled-data Control Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(12): 1721-1725.

[9] Slotine J J E. *Applied Nonlinear Control*[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.