文章编号: 1000−8152(2012)04−0539−05

具有数据丢包的非线性奇异脉冲系统量化控制

赵贤林[1], 费树岷[2], 李　涛[3]

(1. 南京农业大学 工学院, 江苏 南京 210031;

2. 东南大学 自动化学院, 江苏 南京 210096; 3. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 考虑网络传输中存在的数据丢包和信号量化问题, 研究了基于数据丢包的非线性奇异脉冲系统设量化反馈控制器的设计方法. 首先给出一般非线性奇异脉冲系统的数学描述, 并在此基础上建立相应的具有丢包的闭环量化反馈控制系统的数学模型. 其次, 根据李雅普诺夫稳定性理论, 给出了奇异脉冲系统的渐近稳定的充分条件以及量化反馈控制器的设计方法. 应用本设计方法, 可以选择满足代数矩阵不等式条件的量化反馈增益, 实现系统渐近稳定. 最后通过对Chua混沌系统仿真, 表明利用本文设计的量化控制器能够保证闭环非线性奇异脉冲系统在具有数据丢包的情况下渐近稳定.

关键词: 奇异脉冲系统; 数据丢包; 信号量化; 渐近稳定性

中图分类号: TP273　　　**文献标识码**: A

Quantized control for nonlinear singular impulsive systems with data dropouts

ZHAO Xian-lin[1], FEI Shu-min[2], LI Tao[3]

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing Jiangsu 210031, China
2. School of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China
3. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: Considering the problem of data dropouts and signal quantization in network transmission, we propose a method for designing a quantized feedback controller for a nonlinear singular impulsive system with data dropouts. The mathematical description of the nonlinear singular impulsive system is given and the mathematical model of the corresponding closed-loop quantized feedback control system with data dropouts is built. The sufficient condition of the asymptotic stability for the singular pulse system is derived according to Lyapunov function theory; and the design method of the quantized feedback controller is presented. In applying the given design method, the quantized feedback gain is chosen to satisfy a group of matrix algebra inequalities, so that the system asymptotic stability can be ensured. Simulation results of a Chua-system is provided to show the asymptotically stability of close-loop nonlinear singular pulse system with data dropouts, when using the quantized feedback controller.

Key words: singular impulsive systems; data dropouts; signal quantization; asymptotically stability

1　引言(Introduction)

近年来, 信号的量化在自动控制领域中使用越来越广泛, 例如网络控制系统、远程控制系统等. 在量化作用下, 信号中会引入量化误差, 从而对控制系统的稳定性和动态性能带来不利的影响, 因此量化问题作为网络控制系统的重要的研究方向之一越来越受到学者的重视.

以往对信号量化的研究通常假设量化误差是一个均匀分布的白噪声信号, 习惯上也称其为量化噪声. 这一假设具有一定的精度, 但量化误差的白噪声假设终究是一种近似, 它没有精确反映量化器作为非线性环节的本质. 因此把量化器作为一个确定性的非线性环节处理, 重新考虑量化器在网络控制系统模型中的影响, 具有十分重要的实际意义. 近十几年来, 国内外许多学者对基于量化器输出的控制策略进行了研究, 取得了一系列成果[1–7]. 文献[1–3]主要是考虑信号量化对控制系统的稳定性或者稳态误差的影响; 文献[4–7]分别研究了如何设计量化反馈控制器使得网络控制系统渐近稳定、镇定以及动态时变量化器的设计方法. 通过这些研究基本上给出了控制系统基于信号量化的渐近稳定的充分条件和控制器的设计方法.

另一方面, 由于实际系统在运行中经常不可避免的受到外部的脉冲干扰, 因此许多学者对这类混杂系统的稳定性和镇定问题进行了研究, 并得到了许多成果[8–12]. 然而, 这些结果都是基于网络传输中

收稿日期: 2011−01−26; 收修改稿日期: 2011−09−16.
基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(61004032, 60804017).

信号是无限精确基础上得到的. 因此讨论网络传输中信号的量化对混杂系统的影响更具有实际意义. 对于该类问题, 文献[13]研究了基于信号量化的混杂脉冲控制系统的镇定问题. 文献[14]讨论了基于信号量化的脉冲控制系统的H∞控制问题. 但已有的文献主要都是考虑信号量化对非奇异系统的影响.在奇异系统方面, Zhang, Qiu, Yang等对奇异系统进行了广泛和深入的研究, 取得了一系列的研究成果[15–20]. 但这些结果都没有考虑信号的量化问题. 文献[21]则只讨论了离散奇异系统网络脉冲控制器的设计问题, 给出了相应的量化控制器的设计方法. 而对于具有脉冲扰动的连续奇异系统, 如何设计量化控制器保证系统的稳定性还没有文献讨论. 因此本文主要讨论了基于数据丢包的连续非线性奇异脉冲系统的量化控制器设计问题, 给出了相应系统渐近稳定的充分条件和量化反馈控制器的设计方法. 根据建立的非线性奇异脉冲系统的数学模型, 利用李雅普诺夫稳定性理论, 考虑对系统在状态量化反馈信号和具有脉冲扰动的情况下, 设计了量化反馈控制器使奇异系统保证渐近稳定. 本文中, 量化器$q(\cdot)$为对数量化器, 对数量化器的量化集定义为

$$U=\{\pm u^{(i)}: u^{(i)}=\rho^i u^{(0)},\ i=\pm1,\pm2,\cdots\}\cup \{\pm u^{(0)}\}\cup\{0\},\ 0<\rho<1,\ u^{(0)}>0,$$

并且映射关系$q(\cdot)$定义为

$$q(v)=\begin{cases} u_i, & \dfrac{1}{1+\delta}u_i<v<\dfrac{1}{1-\delta}u_i,\\ 0, & v=0,\\ -f(v), & v<0,\end{cases}$$

其中: $\delta=\dfrac{1-\rho}{1+\rho}$, ρ为量化密度.

2 基于量化的奇异脉冲控制系统建模(Modeling of singular impulsive control system via quantization)

考虑具有丢包和时延的奇异脉冲控制系统模型如下:

$$\begin{cases} E\dot{x}(t)=Ax(t)+f(t,x(t),x(t-\tau))+\\ \qquad B\bar{u}(t_k),\ t\neq N_n,\\ x(N_n^+)=(1+c)x(N_n),\ t=N_n,\end{cases}\tag{1}$$

其中: $x(t)\in\mathbb{R}^{n\times n}$为被控对象的状态变量; A,B是适当维数的常数矩阵, c为常数; 定义$E\in\mathbb{R}^{n\times n}$为奇异矩阵当满足条件$0<\operatorname{rank}E=r\leqslant n$时. 不失一般性, 本文假设$E=\begin{bmatrix} I_{\rm r} & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}$, $\{t_k|k=1,2\cdots\}$为系统采样时刻并满足: $0<t_1<t_2<\cdots<t_k<\cdots$, $\lim\limits_{k\to\infty}t_k=\infty$, $\bar{u}(t_k)\in\mathbb{R}^m$为系统具有信号量化的控制器, $f(t,x(t),x(t-\tau))$为非线性函数. 在网络传输过程中, 缓冲区的数学模型可以描述为

$$\bar{u}(t_k)=\begin{cases} u(t_k)=Kx(t_k), & k=1,2,\cdots,\\ \text{传输成功;} & \\ \bar{u}(t_{k-1})=K\bar{x}(t_{k-1}), & k=1,2,\cdots,\\ \text{其他,} & \end{cases}$$

$$\bar{x}(t_k)=\begin{cases} x(t_k), & k=1,2,\cdots,\ \text{传输成功;}\\ \bar{x}(t_{k-1}), & k=1,2,\cdots,\ \text{其他.}\end{cases}$$

设系统的信号量化函数为对数量化$q(\cdot)$, 考虑到数据丢包, 则其量化控制器为

$$\bar{u}(t_k)=(1-\sigma(t_k))K\mu_{t_k}q(\frac{x(t_k)}{\mu_{t_k}})+\sigma(t_k)\bar{u}(t_{k-1}).\tag{2}$$

把式(2)代入式(1)即为基于量化和数据丢包的闭环奇异脉冲控制系统模型:

$$\begin{cases} E\dot{x}(t)=Ax(t)+f(t,x(t),x(t-\tau))+\\ \qquad B(1-\sigma(t_k))K\mu_{t_k}q(\dfrac{x(t_k)}{\mu_{t_k}})+\\ \qquad B\sigma(t_k)\bar{u}(t_{k-1}),\ t\neq N_n.\\ x(N_n^+)=(1+c)x(N_n),\ t=N_n.\end{cases}\tag{3}$$

假设1 对于$t\geqslant t_0$, 非线性函数$f(t,x(t),x(t-\tau))$满足Lipchitz条件, 即存在非负实常数L_1,L_2, 使得对于所有$x(t)\in\mathbb{R}^n$有

$$\|f(t,x(t),x(t-\tau))\|\leqslant L_1\|x(t)\|+L_2\|x(t-\tau)\|.\tag{4}$$

假设2 对于$t\geqslant t_0$, 当$0\leqslant\tau\leqslant S$时, 存在一个正常数$m$, 满足以下不等式:

$$\|x(t-\tau)\|\leqslant m\|x(t)\|,\ 0<m<+\infty.\tag{5}$$

3 基于量化的奇异脉冲系统控制器设计(Controller design for singular impulsive system via quantization)

定理1 如果存在矩阵P,K, 以及正数L_1,L_2, m, 使得以下不等式成立:

$$E^{\rm T}P=P^{\rm T}E\geqslant 0,\tag{6}$$

$$\lambda_{\max}(A^{\rm T}P+P^{\rm T}A)+\lambda_{\max}(P^{\rm T}P)+(L_1+L_2m)^2+\lambda_{\max}(K^{\rm T}B^{\rm T}P)<0,\tag{7}$$

$$\lambda_{\max}(K^{\rm T}B^{\rm T}P)\leqslant 0,\tag{8}$$

$$(1+c)^2\leqslant 1,\tag{9}$$

则非线性奇异网络脉冲控制系统(3)是渐近稳定的.

证 设李雅普诺夫函数为$V(t)=x^{\rm T}(t)E^{\rm T}Px(t)$, 其中$E^{\rm T}P=P^{\rm T}E\geqslant 0$.

情形1 当$t\neq N_n$时, 有

$$
\begin{aligned}
&D^+V(t)= \\
&x^{\mathrm{T}}(t)(A^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A)x(t)+ \\
&f^{\mathrm{T}}(t,x(t),x(t-\tau))Px(t)+ \\
&(1-\sigma(t_k))\mu_{t_k}q^{\mathrm{T}}(\frac{x(t_k)}{\mu_{t_k}})K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}Px(t)+ \\
&\sigma(t_k)u^{\mathrm{T}}(t_{k-1})B^{\mathrm{T}}Px(t)+ \\
&x^{\mathrm{T}}(t)P^{\mathrm{T}}f(t,x(t),x(t-\tau))+ \\
&x^{\mathrm{T}}(t)P^{\mathrm{T}}(1-\sigma(t_k))\mu_{t_k}BKq(\frac{x(t_k)}{\mu_{t_k}})+ \\
&x^{\mathrm{T}}(t)P^{\mathrm{T}}B\sigma(t_k)u(t_{k-1}).
\end{aligned}\tag{10}
$$

又因为

$$
\begin{aligned}
&2f^{\mathrm{T}}(t,x(t),x(t-\tau))Px(t)\leqslant \\
&f^{\mathrm{T}}(t,x(t),x(t-\tau))f(t,x(t),x(t-\tau))+ \\
&x^{\mathrm{T}}(t)P^{\mathrm{T}}Px(t).
\end{aligned}\tag{11}
$$

将式(11)代入式(10)得

$$
\begin{aligned}
&D^+V(t)\leqslant \\
&x^{\mathrm{T}}(t)(A^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A)x(t)+ \\
&f^{\mathrm{T}}(t,x(t),x(t-\tau))f(t,x(t),x(t-\tau))+ \\
&x(t)P^{\mathrm{T}}Px(t)+ \\
&2(1-\sigma(t_k))\mu_{t_k}q^{\mathrm{T}}(\frac{x(t_k)}{\mu_{t_k}})K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}Px(t)+ \\
&2x^{\mathrm{T}}(t)P^{\mathrm{T}}B\sigma(t_k)u(t_{k-1}).
\end{aligned}\tag{12}
$$

由假设1、假设2知, 对于非线性系统$f(t,x(t),x(t-\tau))$有

$$
\|f(t,x(t),x(t-\tau))\|\leqslant(L_1+L_2m)\|x(t)\|.\tag{13}
$$

将式(13)代入式(12)得

$$
\begin{aligned}
&D^+V(t)\leqslant \\
&x^{\mathrm{T}}(t)(A^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A)x(t)+ \\
&(L_1+L_2m)^2x^{\mathrm{T}}(t)x(t)+2(1- \\
&\sigma(t_k))\mu_{t_k}q^{\mathrm{T}}(\frac{x(t_k)}{\mu_{t_k}})K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}Px(t)+ \\
&2\sigma(t_k)u^{\mathrm{T}}(t_{k-1})B^{\mathrm{T}}Px(t)+x(t)P^{\mathrm{T}}Px(t)\leqslant \\
&\lambda_{\max}(A^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A)x^{\mathrm{T}}(t)x(t)+ \\
&(L_1+L_2m)^2x^{\mathrm{T}}(t)x(t)+ \\
&2(1-\sigma(t_k))\mu_{t_k}q^{\mathrm{T}}(\frac{x(t_k)}{\mu_{t_k}})K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}Px(t)+ \\
&2\sigma(t_k)u^{\mathrm{T}}(t_{k-1})B^{\mathrm{T}}Px(t)+ \\
&\lambda_{\max}(P^{\mathrm{T}}P)x^{\mathrm{T}}(t)x(t)= \\
&(\lambda_{\max}(A^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A)+ \\
&\lambda_{\max}(P^{\mathrm{T}}P)+(L_1+L_2m)^2)x^{\mathrm{T}}(t)x(t)+ \\
&2(1-\sigma(t_k))\mu_{t_k}q^{\mathrm{T}}(\frac{x(t_k)}{\mu_{t_k}})K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}Px(t)+ \\
&2\sigma(t_k)u^{\mathrm{T}}(t_{k-1})B^{\mathrm{T}}Px(t).
\end{aligned}
$$

当$\sigma(t_k)=0$, 即没有丢包时:

$$
\begin{aligned}
&D^+V(t)\leqslant \\
&(\lambda_{\max}(A^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A)+ \\
&\lambda_{\max}(P^{\mathrm{T}}P)+(L_1+L_2m)^2)x^{\mathrm{T}}(t)x(t)+ \\
&2\mu_{t_k}q^{\mathrm{T}}(\frac{x(t_k)}{\mu_{t_k}})K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}Px(t)\leqslant \\
&(\lambda_{\max}(A^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A)+ \\
&\lambda_{\max}(P^{\mathrm{T}}P)+(L_1+L_2m)^2)x^{\mathrm{T}}(t)x(t)+ \\
&\lambda_{\max}(K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}P)[\mu_{t_k}q^{\mathrm{T}}(\frac{x(t_k)}{\mu_{t_k}})\mu_{t_k}q(\frac{x(t_k)}{\mu_{t_k}})+ \\
&x^{\mathrm{T}}(t)x(t)]= \\
&[\lambda_{\max}(A^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A)+\lambda_{\max}(P^{\mathrm{T}}P)+ \\
&(L_1+L_2m)^2+\lambda_{\max}(K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}P)]x^{\mathrm{T}}(t)x(t)+ \\
&\lambda_{\max}(K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}P)[\mu_{t_k}q^{\mathrm{T}}(\frac{x(t_k)}{\mu_{t_k}})\mu_{t_k}q(\frac{x(t_k)}{\mu_{t_k}})].
\end{aligned}
$$

同理, 当$\sigma(t_k)=1$, 即有丢包时:

$$
\begin{aligned}
&D^+V(t)\leqslant \\
&(\lambda_{\max}(A^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A)+\lambda_{\max}(P^{\mathrm{T}}P)+ \\
&(L_1+L_2m)^2)x^{\mathrm{T}}(t)x(t)+2u^{\mathrm{T}}(t_{k-1})B^{\mathrm{T}}Px(t)= \\
&(\lambda_{\max}(A^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A)+\lambda_{\max}(P^{\mathrm{T}}P)+ \\
&(L_1+L_2m)^2)x^{\mathrm{T}}(t)x(t)+ \\
&2\lambda_{\max}(K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}P)\mu_{t_k}q^{\mathrm{T}}(\frac{x(t_{k-1})}{\mu_{t_k}})x(t)\leqslant \\
&[\lambda_{\max}(A^{\mathrm{T}}P+P^{\mathrm{T}}A)+\lambda_{\max}(P^{\mathrm{T}}P)+ \\
&(L_1+L_2m)^2+\lambda_{\max}(K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}P)]x^{\mathrm{T}}(t)x(t)+ \\
&\lambda_{\max}(K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}P)[\mu_{t_k}q^{\mathrm{T}}(\frac{x(t_{k-1})}{\mu_{t_k}})\mu_{t_k}q(\frac{x(t_{k-1})}{\mu_{t_k}})].
\end{aligned}
$$

故当式(7)–(8)成立时, $D^+V(t)\leqslant 0$, 即系统在$t\neq N_n$时是渐近稳定的.

情形 2　当$t=N_n$时:

$$
\begin{aligned}
&V(N_n^+)=x(N_n^+)^{\mathrm{T}}E^{\mathrm{T}}Px(N_n^+)= \\
&x^{\mathrm{T}}(N_n)(1+c)E^{\mathrm{T}}P(1+c)x(N_n)\leqslant \\
&(1+c)^2x^{\mathrm{T}}(N_n)E^{\mathrm{T}}Px(N_n).
\end{aligned}\tag{14}
$$

故当式(9)成立时, 系统在$t=N_n$时是渐近稳定的.

综上所述, 当条件(6)–(9)成立时基于信号量化的非线性奇异脉冲网络控制系统NSINCSs(4)是渐近稳定的.　证毕.

由式(4)知, 基于量化的非奇异脉冲控制系统模型如下:

$$
\begin{cases}
\dot{x}(t)=Ax(t)+f(t,x(t),x(t-\tau))+ \\
\qquad B(1-\sigma(t_k))K\mu_{t_k}q(\frac{x(t_k)}{\mu_{t_k}})+ \\
\qquad B\sigma(t_k)\bar{u}(t_{k-1}),\ t\neq N_n. \\
x(N_n^+)=(1+c)x(N_n),\ t=N_n.
\end{cases}\tag{15}
$$

对于该系统有以下推论:

推论 1 如果对于给定的矩阵P, K, 以及正数L_1, L_2, m, 使得以下不等式成立:

$$\lambda_{\max}(A^{\mathrm{T}}P + P^{\mathrm{T}}A) + \lambda_{\max}(P^{\mathrm{T}}P) + (L_1 + L_2m)^2 + \lambda_{\max}(K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}P) < 0, \tag{16}$$

$$\lambda_{\max}(K^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}P) \leqslant 0, \tag{17}$$

$$(1 + c)^2 \leqslant 1, \tag{18}$$

则基于量化的非线性网络脉冲控制系统(15)是渐近稳定的.

4 数值举例(Numerical example)

例 对于给定的基于信号量化的连续非线性网络脉冲系统

$$\begin{cases} E\dot{x}(t) = Ax(t) + f(t, x(t), x(t-\tau)) + \\ \qquad B(1-\sigma(t_k))K\mu_{t_k}q(\dfrac{x(t_k)}{\mu_{t_k}}) + \\ \qquad B\sigma(t_k)\bar{u}(t_{k-1}),\ t \neq N_n, \\ x(N_n^+) = (I + c)x(N_n),\ t = N_n. \end{cases}$$

参数分别为

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},\ c = -0.2,\ A = \begin{bmatrix} -\alpha & \alpha & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\ K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_4 \end{bmatrix},$$

$$f(t, x(t), x(t-\tau)) = ((-b\alpha x_1 - \frac{\alpha}{2(a-b)}(|x_1+1| - |x_1-1|))^{\mathrm{T}}\ 0\ 0\ 0)^{\mathrm{T}},$$

其中$(\alpha, \beta, a, b) = (9, \dfrac{100}{7}, -\dfrac{8}{7}, -\dfrac{5}{7})$. 则当$K = 0$, $c = 0$该非线性奇异脉冲系统状态x_1, x_2, x_3构成Chua混沌系统, 其轨迹如图1所示, 状态x_4轨迹如图2所示.

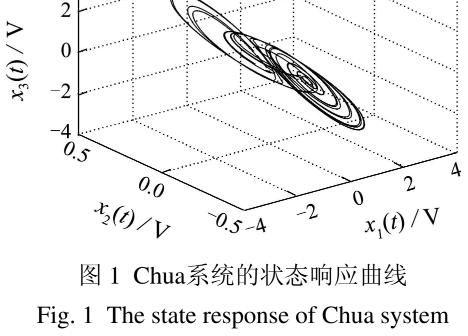

图 1 Chua系统的状态响应曲线

Fig. 1 The state response of Chua system

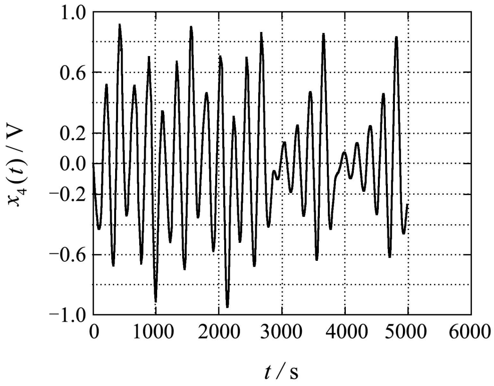

图 2 状态x_4响应曲线

Fig. 2 The state response of x4

本例中非线性项中$\tau = 0$. 事实上若$\tau \neq 0$, 根据假设1与假设2可知, 则相当于Lipchitz条件的最小上界增大, 即相当于本文中的$L_1 + L_2m$增大, 因此本例中选择$\tau = 0$在本文的假设下仍不失一般性. 由文献[19]知, 可取$L_1 + L_2m = 10.2875$. 选取$\mu_{t_k} = 20$, $\Delta = 0.5, P = E$, 那么根据定理1中式(7)–(8)可得

$$K \leqslant \mathrm{diag}\{-120.6625, -120.6625, -120.6625, 0\}.$$

当数据丢包率为$\mathrm{P}(\sigma(k) = 0|0.8)$, 初始状态为$\varphi(t) = [0.152\ \ 0.022\ \ 0.381\ \ -0.044]^{\mathrm{T}},\ t \in (-\tau, 0)$, 量化反馈控制器增益在上述集合中选取$K = \mathrm{diag}\{-500, -500, -500, 0\}$ 时系统的状态响应曲线如图3所示.

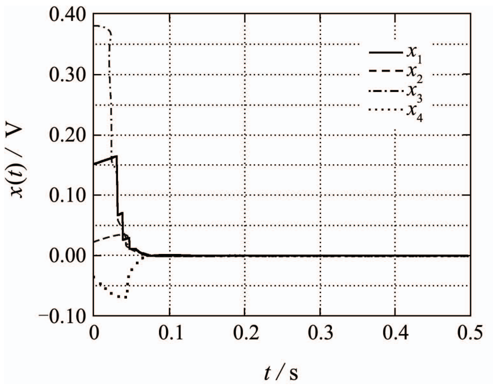

图 3 系统的状态响应曲线

Fig. 3 The system state response

从图3中可以看出, 利用本文设计的量化控制器能够保证闭环非线性奇异脉冲系统是渐近稳定的.

5 结论(Conclusions)

本文研究了具有丢包的闭环非线性奇异网络脉冲控制系统的量化反馈控制器设计问题. 建立了具有数据丢包的非线性奇异网络脉冲控制系统的数学模型, 得到了系统渐近稳定的充分条件, 并给出了量化反馈控制器的详细设计方法. 根据给定方法设计的化反馈控制器能够保证非线性奇异系统在具有数据丢失和脉冲扰动作用下仍然保持稳定. 最后, 通

过Chua混沌系统的仿真算例, 说明了笔者提出的方法是有效的并且具有一定的实际应用价值.

参考文献(References):

[1] FAGNANI F, ZAMPIERI S. Stability analysis and synthesis for scalar linear systems with a quantized feedback[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(9): 1569 – 1584.

[2] NAIR G N, EVANS R J. Exponential stability of finite dimensional linear systems with limited data rates[J]. *Automatica,* 2003, 39(4): 585 – 593.

[3] MILLER R K, MICHEL A N, FARRELL J A. Quantizer effects on steady-state error specification of digital feedback control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1989, 34(6): 651 – 655.

[4] TIAN E G, YUE D, PENG C. Quantized output feedback control for networked control systems[J]. *Information Sciences,* 2008, 178(12): 2734 – 2749.

[5] PENG C, TIAN Y C. Networked control of linear systems with state quantization[J]. *International Journal of Information Sciences*, 2007, 177(24) : 356 – 364.

[6] LEE K, HADDAD A H. Stabilization of stochastic quantized control systems[C] //*Proceedings of the American Control Conference*. New York: IEEE, 1999: 865 – 969.

[7] 姜翀, 张庆灵. 具有非线性摄动网络控制系统的量化控制设计[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(9): 1230 – 1233.
(JIANG Chong, ZHANG Qingling. Design of quantized feedback control of networked control systems with nonlinear perturbation[J]. *Journal of Northeast University (Natural Science Edition)*, 2010, 31(9): 1230 – 1233.

[8] YANG T. *Impulsive Systems and Control: Theory and Application*[M]. New York: Nova Science Publishers, 2001.

[9] HESPANHA J, LIBERZON D, TEEL A. Lyapunov characterizations of input-to-state stability for impulsive systems[J]. *Automatica*, 2008, 44(11): 2735 – 2744.

[10] LI Z G, WEN Y C, SOH Y C. Analysis and design of impulsive control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46(6): 894 – 897.

[11] YANG Z, XU D. Stability analysis and design of impulsive control system with time delay[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(8): 1148 – 1154.

[12] GUAN Z H, YAO J, HILL D J. Robust H∞ control of singular impulsive systems with uncertain perturbations[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems,* 2005, 52(6): 293 – 298.

[13] YANG Z C, HONG Y G, JIANG Z P, et al. Quantized feedback stabilization of hybrid impulsive control systems[C] //*Proceedings of the Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and the 28th Chinese Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 3903 – 3908.

[14] ZHANG Y G, LIU C X. H∞ control of impulsive systems with quantized[C] //*Proceedings of the 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering.* New York: IEEE, 2010: 1104 – 1107.

[15] YANG D M, SHA C M, ZHANG Q L. H_2 analysis and parameterized H_2 observer design for descriptor systems[C] //*Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 2370 – 2374.

[16] 朱淑倩. 线性奇异时滞系统的鲁棒控制[D]. 济南: 山东大学, 2005.
(ZHU Shuqian. *Robust control for linear singular time-delay systems*[D]. Jinan: Shangdong University, 2005.)

[17] ZHAO Z H, ZHANG G S, ZHANG Q L. Dynamic output feedback control for descriptor systems with time-delay[C] //*The 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE, 2006, (1): 631 – 635.

[18] QIU Z Z, ZHANG Q L, DIAO C H, et al. Robust stability of a class of networked control systems based on descriptor system[C] //*Proceedings of the 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 1166 – 1170.

[19] LIU P Y, ZHANG Q L, YANG X G, et al. Passivity and optimal control of descriptor biological complex systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control,* 2008, 53(SI): 122 – 125.

[20] JIANG C, ZOU D X, ZHANG Q L, et al. Optimal tracking control for a class of large-scale interconnected system with time-varying delay[C] //*IEEE International Conference on Control and Automation*. Piscataway, NJ: IEEE 2007: 2529 – 2534.

[21] 赵贤林, 费树岷, 林金星. 基于信号量化的离散奇异系统网络脉冲控制器设计[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(3): 549 – 553.
(ZHAO Xianlin, FEI Shumin, LIN Jinxing. The quantized controller design for discrete singular impulsive systems based on data dropouts[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition),* 2011, 41(3): 549 – 553.)

[22] 张群娇, 陆君安, 何克清. 一类动力系统的时滞脉冲控制[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(10): 1686 – 1689.
(ZHANG Qunjiao, LU Jun'an, HE Keqing. Time-delayed impulsive control for a class of dynamical systems[J]. *Systems Engineering and Electronics,* 2007, 29(10): 1686 – 1689.)

作者简介:

赵贤林　(1973—), 男, 博士, 副教授, 目前研究方向奇异系统、网络脉冲控制系统等, E-mail: zhxl@njau.edu.cn;

费树岷　(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向非线性控制系统设计和综合、混杂系统分析、时滞系统控制等, E-mail: smfei@seu.edu.cn;

李　涛　(1979—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为复杂网络及时滞系统分析与综合, E-mail: huainanlitao@yahoo.com.cn.