

基于脉冲微分系统模型的有损网络控制系统研究

黄 剑, 关治洪, 王仲东

(华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对闭环网络控制系统, 在考虑网络数据传输可能发生丢包的情况下, 提出了一类切换系统模型, 并在此基础上导出了一类脉冲微分系统模型. 从数学上严格分析了该模型的合理性, 并利用驻留时间的概念得到了此系统模型的稳定性条件, 进一步研究了能够忍受一定程度的数据丢包的稳定化控制器设计问题. 最后给出了一个具体示例.

关键词: 网络控制系统; 脉冲微分系统; 切换系统; 稳定性

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Research of networked control systems with data packet dropouts based on model of impulsive systems

HUANG Jian, GUAN Zhi-hong, WANG Zhong-dong

(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: In this paper, a switched system model is presented for networked control systems with data packet dropouts. Moreover an impulsive system model is obtained from this switched system. The exponential stability of the impulsive system is studied by introducing the concept of dwell-time. A state feedback controller with tolerance of certain data dropouts is designed. Main results are given in linear matrix inequalities. Finally a numerical example is shown to demonstrate the theoretical results.

Key words: networked control systems; impulsive systems; switched systems; stability

1 引言 (Introduction)

近年来, 基于现场总线等控制网络的网络控制系统(NCSs)在各行各业得到了广泛的应用. 新的系统形式带来了新的问题, 在很多时候, 通信信道中都存在着干扰. 这些干扰有可能使通信过程失败, 从而导致分组(Packet)的丢失, 亦即所谓的丢包现象. 一般的, 我们把可能发生数据传输丢包的网络控制系统称为有损网络控制系统. Hassibi 等^[1]针对 NCSs 提出了异步动态系统的概念, Zhang 等^[2]应用该理论分析了 NCSs 的稳定性问题. 从本质上看异步动态系统属于混合动态系统的范畴, 而在混合动态系统的研究中, 切换系统的成果尤为丰富. 一些文献^[3-6]从各个角度研究了切换系统的稳定性. Morse^[5], Hespanha^[6]首先提出了驻留时间(dwell-time)的概念, 只要整个切换系统在每个自身渐稳的子系统上驻留足够长的时间, 那么切换系统将保持稳定. Ye^[7]关于脉冲微分系统提出了一些新的结

果. 本文根据前人的结果和网络丢包的特点, 为 NCSs 提出了一个切换系统模型, 进一步证明了该模型与一类脉冲微分系统在稳定性上的等价性, 并应用驻留时间的概念, 获得了系统的稳定性条件, 最后给出了镇定控制器的设计方法.

2 问题的描述 (Problem formulation)

一种简化的有损网络控制系统如图 1 所示:

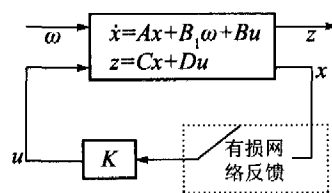


图 1 有损网络系统模型示意图

Fig. 1 A model of networked control systems with data packet dropouts

关于该模型, 我们作以下假设:

1) 网络传输速度非常快, 当网络传输正常时可

以忽略掉传输延迟的影响,系统近似看作为无时滞连续反馈控制系统;

2) 使用一个采样开关表示网络的状态. 网络通信正常则此开关闭合,表示状态反馈无损失地传输到控制中心,系统等价于一个通常的连续反馈控制系统;当丢包发生过程中,此开关断开,没有新的状态信息反馈回来,为简化控制器设计,此时将控制输入 u 保持为 0;

3) 每次丢包发生的时间区间长度是有界的,即系统总能在丢包事件发生一定时间后回到正常状态. 设这个时间上界为 $T_L (0 < T_L < +\infty)$.

显然网络持续丢包和通信恢复正常这两个事件是交替发生的. 记这些事件交替的起始时刻集合为 $\Gamma = \{t_0, t_1, t_2, \dots | 0 \leq t_0 < t_1 < t_2 < \dots\}$, 即从 $t_0 \rightarrow t_1$ 期间通信正常,从 $t_1 \rightarrow t_2$ 期间持续丢包, ... 引入记号 $\Omega_1 = \bigcup_{k=1}^{\infty} \{(t_{2k-1}, t_{2k}]\}$ 和 $\Omega_2 = \bigcup_{k=1}^{\infty} \{(t_{2k-2}, t_{2k-1}]\}$ 分别表示持续丢包时间区间集合、持续通信正常时间区间集合. 设 $T = \Omega_1 \cup \Omega_2 = [t_0, \infty)$ 为整个系统的定义域. 综合以上假设,得到一个切换系统模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \\ u(t) = 0, t \in \Omega_1; \\ \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \\ u(t) = Kx(t), t \in \Omega_2. \end{cases} \quad (1)$$

其中 $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$, $k \in \mathbb{N}$, A, B, K 为合适维数的非零矩阵,系统在 $t = t_0$ 处连续,初始条件 $x(t_0) = x(t_0^+) = x_0$. 注意这里 $x(t^+) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} x(t + \Delta t)$, 只分析 ω 为 0 的情况.

3 稳定性分析 (Stability analysis)

可将切换系统(1)改写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + BK)x(t), t \in \Omega_2, \\ x(t_{2k}^+) = I_k x(t_{2k-1}), k \in \mathbb{N}, \end{cases} \quad (2)$$

其中 $x(t_0) = x(t_0^+) = x_0$, $\mathbb{N}$ 为自然数, I_k 满足

$$I_k = \exp(AT_k), T_k = t_{2k} - t_{2k-1} < T_L. \quad (3)$$

注意系统(2)仅在时间轴的部分定义域 $t \in \Omega_2 \cup \{t_0\}$ 上写出了动力学形式. 在 $t \in \Omega_1$ 期间,系统的演化使用迭代 I_k 实现,由此联想到脉冲微分系统模型. 首先给出以下定义.

定义 1 设 $g: \Omega_2 \cup \{t_0\} \rightarrow T$, 函数 g 的功能是将 $\Omega_2 \cup \{t_0\}$ 中的点按照时间先后的顺序连续地映射到微分方程的定义域 T 中,其示意图如图 2 所示.

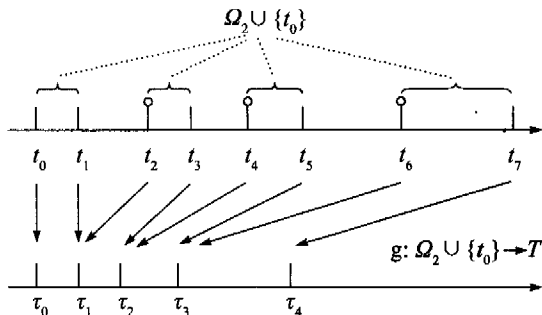


图 2 映射 $g: \Omega_2 \cup \{t_0\} \rightarrow T$

Fig. 2 Mapping $g: \Omega_2 \cup \{t_0\} \rightarrow T$

显然 g 是可逆的,即 g^{-1} 存在.

映射 g 的数学表达式可写出如下:

$$g(t) = \begin{cases} t, & t \in [t_0, t_1), \\ \tau_k, & t = t_{2k-1}, k \in \mathbb{N}, \\ \tau_k + t - t_{2k}, & t \in (t_{2k}, t_{2k+1}), k \in \mathbb{N}. \end{cases} \quad (4)$$

注意这里 $\tau_k = g(t_{2k-1})$, $k \in \mathbb{N}$ 为对应网络系统开始丢包的时刻,且有 $\tau_k - \tau_{k-1} = t_{2k-1} - t_{2k-2}$, $k \in \mathbb{N}$ 成立.

考虑如下脉冲微分系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + BK)x(t), t \neq \tau_k, t \geq \tau_0 = t_0, \\ x(\tau_k^+) = I_k x(\tau_k), k \in \mathbb{N}, \end{cases} \quad (5)$$

其中 $x \in \mathbb{R}^n$, A, B, K 定义同系统(1),脉冲发生的时刻满足 $\tau_k = g(t_{2k-1})$, $k \in \mathbb{N}$,可用离散的闭集 $\tilde{\Gamma} = \{\tau_k | k \in \mathbb{N}\}$ 表示脉冲发生时刻序列;跳变矩阵 I_k 满足式(3),初始条件同系统(1).

定理 1 系统(1)的零解在 $t \in T$ 上是稳定的,当且仅当系统(5)的零解在 $t \in T$ 上稳定.

证 不妨设系统(1)和系统(5)的初始条件都是 $x(t_0) = x_0$. 分别使用 $x(t)|_{(1)}$, $x(t)|_{(5)}$ 来表示系统(1)和系统(5)在此初始条件下的解. 根据微分方程解的形式可得:

当 $t_0 < t \leq t_1 = \tau_1$ 时有

$$x(t)|_{(5)} = \exp((A + BK)(t - t_0)) \cdot x_0 = x(g^{-1}(t))|_{(1)}.$$

当 $\tau_k < t \leq \tau_{k+1}$, $k \in \mathbb{N}$ 时有

$$x(t)|_{(5)} = \exp((A + BK)(t - \tau_k)) \cdot$$

$$\left[\prod_{j=k}^2 I_j \cdot \exp((A + BK)(\tau_j - \tau_{j-1})) \right] \cdot$$

$$I_1 \cdot \exp((A + BK)(t_1 - t_0)) \cdot x_0.$$

那么根据映射 g 的定义,显然有

$$x(t)|_{(5)} = \exp((A+BK)(g^{-1}(t) - t_{2k-1})) \cdot \left[\prod_{j=k}^2 I_j \cdot \exp((A+BK)(t_{2j-1} - t_{2j-2})) \right] \cdot I_1 \cdot \exp((A+BK)(t_1 - t_0)) \cdot x_0 = x(g^{-1}(t))|_{(1)}.$$

综上所述有 $x(t)|_{(5)} = x(g^{-1}(t))|_{(1)}$, $t \in T$ 成立. 余下证明是显而易见的, 此处省略.

注 上述方法可以类似地推广到一致稳定性、渐近稳定性、一致渐稳性、指数稳定性等等, 亦即系统(1)和系统(5)在解的各种稳定性性质方面是完全等价的系统.

关于系统(5), 文献[7]给出了稳定性的判据, 然而此判据难于用于实际验证. 以下使用类似 Hespanha^[6]的方法, 我们在脉冲微分系统中引入驻留时间(dwell-time)和平均驻留时间(average dwell-time)的概念, 并在此基础上给出系统(5)更为简洁的稳定性判据.

根据文献[6]引入如下记号:

$\Omega[\tau_D]:= \{ \{ \tau_k \} \mid \tau_k - \tau_{k-1} \geq \tau_D, k \in \mathbb{N} \}$ 称 $\Omega[\tau_D]$ 为驻留时间不小于 τ_D 的脉冲发生时刻序列的集合, 注意满足 $\tau_k - \tau_{k-1} \geq \tau_D$ 的任意脉冲发生时刻序列都是 $\Omega[\tau_D]$ 中的一个元素;

$N(t, \tau)$: 表示在任意时间区间 (τ, t) 内, 发生脉冲跳变的次数, 其中 $t > \tau > t_0$; $\Omega_{ave}[\tau_D]:= \{ \{ \tau_k \} \mid N(t, \tau) \leq N_0 + \frac{t-\tau}{\tau_D}, \forall t > \tau > t_0, k \in \mathbb{N} \}$, $N_0 > 0$. 则称 $\Omega_{ave}[\tau_D]$ 为平均驻留时间不小于 τ_D 、具有抖颤界 N_0 的脉冲发生时刻序列的集合;

根据以上定义, 若系统(5)的脉冲发生时刻序列满足 $\tilde{\Gamma} \in \Omega[\tau_D]$ 或 $\tilde{\Gamma} \in \Omega_{ave}[\tau_D]$, 则它们的任意两个相邻的脉冲发生时刻间的间距(平均间距)必大于等于 τ_D .

定理2 若在系统(5)中 $(A+BK)$ 满足: $\exists c, \lambda_0 > 0$ 使得

$$\|\exp((A+BK)t)\| \leq c \exp(-\lambda_0 t) \quad (6)$$

成立, 则只要 $\tau_D > \frac{\ln Mc}{\lambda_0}$, 脉冲微分系统(5)的脉冲发生时刻序列满足 $\tilde{\Gamma} \in \Omega_{ave}[\tau_D]$ 时, 系统的解就在 T 上以衰减率 λ_0 指数渐近稳定. 其中 M 满足

$$M = \exp(\|A\|T_L). \quad (7)$$

不失一般性, 这里假设 $Mc > 1$.

证 设 $\Psi = A+BK$, 则有

$$\|\exp(\Psi)\| \leq c \exp(-\lambda_0 t).$$

$\forall t \in T$, 设在时间区间 (t_0, i) 内的脉冲发生时刻为

$\{ \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m, m \in \mathbb{N} \} \subset \tilde{\Gamma}$, 则有

$$x(t) = \exp(\Psi(t - \tau_m)) \cdot \left(\prod_{i=m}^2 I_i \exp(\Psi(\tau_i - \tau_{i-1})) \right) \cdot I_1 \exp(\Psi(\tau_1 - t_0)) \cdot x(t_0),$$

由式(3), 有

$$\|I_k\| \leq \exp(\|A\|T_k) \leq \exp(\|A\|T_L) = M, k \in \mathbb{N},$$

则对 $x(t)$ 的表达式两边取范数有

$$\begin{aligned} \|x(t)\| &\leq \|\exp(\Psi(t - \tau_m))\| \cdot \left(\prod_{i=m}^2 \|I_i\| \|\exp(\Psi(\tau_i - \tau_{i-1}))\| \right) \cdot \|I_1\| \cdot \|\exp(\Psi(\tau_1 - t_0))\| \cdot \|x(t_0)\| \\ &\leq c(Mc)^m \cdot \exp(-\lambda_0(t - t_0)) \cdot \|x(t_0)\|. \quad (8) \end{aligned}$$

若系统的脉冲发生时刻序列满足 $\tilde{\Gamma} \in \Omega_{ave}[\tau_D]$, 则在时间区间 (t_0, t) 内发生脉冲跳变的

次数 $N(t, t_0) = m \leq N_0 + \frac{t - t_0}{\tau_D}$, 则有

$$\begin{aligned} \|x(t)\| &\leq c \cdot (Mc)^{N_0 + \frac{t-t_0}{\tau_D}} \cdot \exp(-\lambda_0(t - t_0)) \cdot \|x(t_0)\| = \\ &c' \cdot \exp\left(\left(\frac{\ln Mc}{\tau_D} - \lambda_0\right) \cdot (t - t_0)\right) \cdot \|x(t_0)\|, \quad (9) \end{aligned}$$

其中 $c' = c \cdot \exp(N_0 \cdot \ln Mc)$ 为常数.

从式(9)可以看出, 只要 $\tau_D > \frac{\ln Mc}{\lambda_0}$, 则系统的解在 $[t_0, \infty)$ 上必以衰减率 λ_0 指数渐近稳定.

得证.

定理3 若在系统(5)中 $(A+BK)$ 满足式(6), 则对任意的 $\lambda \in (0, \lambda_0)$, 只要 $\tau_D > \frac{\ln Mc}{\lambda_0 - \lambda}$, 脉

冲微分系统(5)的脉冲发生时刻序列满足 $\tilde{\Gamma} \in \Omega[\tau_D]$, 系统的解就在 T 上以衰减率 λ_0 指数渐近稳定. (这里 M 满足式(7)描述)

证 参照 Hespanha^[6]的思想以及定理2, 很容易得到证明.

注 定理3和定理2具有明确的物理解释: 在网络每次发生故障的持续时间具有上界 T_L 的情况下, 只要在任何两次故障之间系统能够连续正常工作一段不小于 τ_D 的时间(或者从总体上的平均连续正常工作时间不小于 τ_D), 那么整个网络控制系统就能够保证稳定, 其中 τ_D 是与 T_L 以及系统参数有关的常数.

4 镇定控制器的设计 (Controller synthesis for stabilization)

上节关于有损网络控制系统的稳定性分析结果

表明,只要原始系统是稳定的并且数据丢包足够少(驻留时间 τ_D 足够长),那么系统的稳定性就依然能得到保证,这个结论是可以直观预见的.若在驻留时间 τ_D 和最大丢包持续时间 T_L 事先确定的情况下能够设计出镇定系统(5)的控制器,那么只要给出的 τ_D 相对较小,则意味着这种控制器能够忍受一定程度的数据丢包影响,这样研究将更为有意义.

以下给出此镇定控制器的存在性定理.

定理4 对于给定的正数 τ_D ,若存在矩阵 K ,使得对系统(5)有 LMI

$$A^T + K^T B^T + A + BK + 2\gamma \cdot I < 0 \quad (10)$$

成立,其中正标量 γ 满足:

$$\gamma > \frac{\ln M}{\tau_D}. \quad (11)$$

M 满足式(7),则若系统(5)的脉冲发生时刻序列满足 $\tilde{T} \in \Omega[\tau_D]$ 或 $\tilde{T} \in \Omega_{ave}[\tau_D]$,系统的解在 T 上均以衰减率 $\lambda = \gamma - \frac{\ln M}{\tau_D}$ 指数渐近稳定.

证 沿系统(5)的任意解 $x(t)$ 定义函数

$$V(x(t)) = x^T(t)x(t).$$

则当 $t \in (\tau_{k-1}, \tau_k), k \in \mathbb{N}$ 时必有

$$\begin{aligned} \dot{V}(x(t)) &= x^T(t)((A+BK)^T + A+BK)x(t) \leq \\ &-2\gamma \cdot x^T(t)x(t) = -2\gamma \cdot V(x(t)). \end{aligned}$$

那么 $\forall t_1, t_2 \in (\tau_{k-1}, \tau_k), k \in \mathbb{N}, t_2 > t_1$ 由比较原理显然有

$$V(x(t_2)) \leq \exp(-2\gamma(t_2 - t_1)) \cdot V(x(t_1)).$$

则根据欧氏范数的定义有:

$$\|x(t_2)\| \leq \exp(-\gamma(t_2 - t_1)) \cdot \|x(t_1)\|. \quad (12)$$

另一方面,在脉冲发生点处有

$$\|x(\tau_k^+)\| \leq \|I_k\| \|x(\tau_k)\| \leq M \cdot \|x(\tau_k)\|. \quad (13)$$

对于时间区间 $(t_0, t), \forall t > t_0$, 设 $\{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m, m \in \mathbb{N}\} \subset \tilde{T}$ 为该时间区间中发生脉冲跳变的时刻集合.下面分两种情况讨论:

1) 若系统(5)的脉冲发生时刻序列满足 $\tilde{T} \in \Omega[\tau_D]$,对于任意的 $t > t_0$,根据式(12)(13)可得其解的形式满足

$$\begin{aligned} \|x(t)\| &\leq \exp(-\gamma(t - \tau_m)) \cdot \|x(\tau_m^+)\| \leq \\ &\exp(-\gamma(t - \tau_m)) \cdot M \cdot \|x(\tau_m)\| \leq \dots \leq \\ &\exp(-\gamma(t - \tau_1)) \cdot M^m \cdot \|x(\tau_1)\| \leq \\ &\exp(-\gamma(t - t_0)) \cdot M^m \cdot \|x(t_0)\| = \\ &\exp(m \cdot \ln M - \gamma(t - t_0)) \cdot \|x(t_0)\|. \end{aligned}$$

注意到脉冲发生时刻序列 $\tilde{T} \in \Omega[\tau_D]$ 表明此时有

$(m-1) \cdot \tau_D \leq t - t_0$, 则上式可以转换为

$$\|x(t)\| \leq M \cdot \exp\left(-\left(\gamma - \frac{\ln M}{\tau_D}\right) \cdot (t - t_0)\right) \cdot \|x(t_0)\| =$$

$$M \cdot \exp(-\lambda \cdot (t - t_0)) \cdot \|x(t_0)\|,$$

则系统(5)的解在 T 上以衰减率 λ 指数渐近稳定.

2) 若系统(5)的脉冲发生时刻序列满足 $\tilde{T} \in \Omega_{ave}[\tau_D]$,同样根据式(12)(13)可知系统(5)的解满足式(14)的描述.

同时注意到

$$N(t, t_0) = m \leq N_0 + \frac{t - t_0}{\tau_D}. \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)可得:

$$\|x(t)\| \leq$$

$$\exp\left(\left(N_0 + \frac{t - t_0}{\tau_D}\right) \cdot \ln M - \gamma(t - t_0)\right) \cdot \|x(t_0)\| =$$

$$\exp(N_0 \ln M) \cdot \exp\left(-\left(\gamma - \frac{\ln M}{\tau_D}\right) \cdot (t - t_0)\right) \cdot \|x(t_0)\| =$$

$$M^{N_0} \cdot \exp(-\lambda(t - t_0)) \cdot \|x(t_0)\|.$$

则同样系统(5)的解在 $[t_0, \infty)$ 上以衰减率 λ 指数渐近稳定.综合情况1),2)定理得证.

注 定理4将设计有损网络控制系统能够忍受一定程度丢包影响的控制器的问题转化成为求解形如式(10) LMI的可解性问题,从而利用MATLAB中的feasp工具箱可以对其进行求解.注意到证明中 V 函数的选取是非常特殊的,因而此充分条件较为保守,当 λ 较大时,式(10)所示的LMI甚至可能无解.

5 示例(Examples)

对系统(1),取 $x \in \mathbb{R}^2, u \in \mathbb{R}^2, A = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 0 & -3 \end{bmatrix}$,

$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,设初始条件为 $x(0) = x_0 = [10 \ 7]^T$,

设 $T_L = 1 \text{ s}, \tau_D = 5 \text{ s}$.

则由式(7)可计算得:

$$M = \exp(\|A\|T_L) = 25.9615,$$

$$\gamma > \frac{\ln M}{\tau_D} = 0.6613.$$

不妨取 $\gamma = 0.6623$,根据定理4我们解如式(10)所示LMI可得 $K = \begin{bmatrix} -3.2624 & -0.3228 \\ -0.3228 & -0.0342 \end{bmatrix}$,即为得到的镇定控制器反馈增益矩阵.

参考文献(References):

- [1] HASSIBI A, BOYD S P, HOW J P. Control of asynchronous dynamical systems with rate constraints on events [C] // Proc

- of *IEEE Conference of Decision and Control*. Phoenix: [s. n.], 1999; 1345 - 1351.
- [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] BRANICKY M S. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(4): 475 - 482.
- [4] PELETIES P, DECARLO R. Asymptotic stability of m-switched systems using Lyapunov-like functions [C] // *Proc of American Control Conference*. Boston: [s. n.], 1991; 1679 - 1684.
- [5] MORSE A S. Supervisory control of families of linear set-point controllers Part I: exact matching [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(10): 1413 - 1431.
- [6] HESAPANHA J P. Stability of switched systems with average dwell-time [C] // *Proc of IEEE Conference of Decision and Control*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 1999; 2655 - 2660.
- [7] YE H, MICHEL A N, HOU L. Stability analysis of systems with impulse effects [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(12): 1719 - 1723.

作者简介:

黄剑 (1975—),男,2000年在华中科技大学控制科学与工程系获硕士学位,现为华中科技大学控制科学与工程系讲师,在读博士研究生,主要研究方向为管控一体化、网络控制系统的分析与建模, E-mail: huang_jan531@126.com;

关治洪 (1955—),男,1994年在华南理工大学获博士学位,同年晋升为教授,现为华中科技大学控制科学与工程系教授,博士生导师,主要研究方向为脉冲与混合系统、非线性与复杂系统控制;

王仲东 (1944—),男,1968年毕业于原哈尔滨军事工程学院,现为华中科技大学控制科学与工程系教授,主要研究方向为管控一体化、网络控制、智能仪器仪表研制。

《机械手神经网络稳定自适应控制的理论与方法》书评

由孙富春教授、孙增圻教授、张钹院士撰写的《机械手神经网络稳定自适应控制的理论与方法》专著主要论述了作者近年来在机械手神经网络稳定自适应控制方面取得的系统性理论成果。全书10章涵盖了基于线性参数化神经网络、多层神经网络和动态神经网络的机械手稳定自适应控制理论与方法,主要包括考虑采样周期的采样数据神经网络自适应控制、考虑神经网络逼近误差的神经网络自适应控制、考虑状态不完全可量测以及含柔性连杆的机械手自适应控制等。研究工作覆盖了机械手神经网络运动控制的主要内容,具体如下:

1)本书提出的神经变结构控制是神经网络基函数与系统跟随误差度量的有机调制,它贯穿于系统控制过程的始终,并能随着系统跟随误差度量向开关流形的趋近动态地调整控制量的大小。在反馈线性化应用中,神经网络用于逼近的是逆函数,从而可以避免许多理论推证以及控制器实现上的复杂性。基于神经变结构的设计思想,建立了较为完成机械手神经网络稳定自适应控制方法,这套理论方法包括离散时间与连续时间、神经网络逼近误差界已知和未知、直接自适应与间接自适应以及机械手是否含柔性连杆共8种情形,该部分理论构成了本书的主要内容,而且自成体系,具有较强的理论性和系统性,反映了机械手神经网络自适应控制的最新成果。

2)在基于观测器的机械臂神经网络稳定自适应控制方法的研究中,本书提出的方法采用一个线性观测器估计机械臂的关节角速度,非线性参数化(任意多层)神经网络用于逼近修正的机械手动力学非线性,整个控制器—观测器设计仅需一个神经网络,结构简单。在理论方面的贡献包括:a)在基于观测器的机械手神经网络稳定控制中提出了采用线性降维观测器估计机械手的关节角速度,有效地避免了如何设计观测器的结构以避免观测器动态过程、神经网络学习与被控对象动力学的耦合;b)在基于观测器的机械手神经网络稳定自适应控制中研究了基于非线性参数化神经网络的自适应控制,给出了参数学习律和系统的稳定性证明。

3)在机械手的动态神经网络稳定自适应控制研究方面,所提出的动态逆自适应控制方案无需假设系统的状态位于某一紧集,并能保证神经模糊自适应控制系统在控制初始段的动态品质。

书稿研究内容新颖、理论性强、阐述问题系统、清楚,图表等符合规范。全书10章除第1章内容将发表在《控制理论与应用》外,其余章节均发表在国际重要刊物上,如IEEE神经网络汇刊(两篇长文),系统、人及控制论文汇刊以及Automatica等共8篇,有8篇论文收入SCI,SCI他人引用45次,单篇最高引用13次,说明该书内容具有创新性和较高的学术水平,是机器人和非线性系统智能控制研究领域的一本好书。对从事信息科学、工程技术和数学以及相关学科的科研人员和高等学校的教师、研究生、高年级学生具有较高的参考价值。

(香港中文大学 王钧)