

变采样周期和多包传输的非线性 NCS 故障检测

赵彦, 王玉龙

(江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 研究具有多包传输、时变采样周期和未知干扰输入的 Lipschitz 非线性网络控制系统的故障检测问题; 利用主动变采样周期的方法将多包传输的非线性连续网络控制系统建模为离散切换系统, 设计基于观测器的鲁棒故障检测滤波器构造残差产生系统, 运用 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式 (LMI) 技术, 给出了使闭环系统渐近稳定的充分条件及故障检测滤波器的增益矩阵; 最后运用仿真算例说明了故障检测滤波器的残差产生系统对故障具有敏感性, 同时对外部扰动输入具有鲁棒性。

关键词: 非线性网络控制系统; 时变采样周期; 多包传输; 故障检测; 鲁棒性

Fault Detection for Nonlinear Networked Control Systems with Time Varying Sampling Period and Multi-packet Transmission

Zhao Yan, Wang Yulong

(College of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: The problem of fault detection is considered for the Lipschitz nonlinear networked control systems with multi-packet transmission and time-varying sampling period and unknown interference inputs, with time-varying sampling period of switching method to nonlinear networked control systems with multiple packet transmission is modeled as a discrete switched systems, a robust fault detection filter is designed based on observer structure residual generation system, based on the Lyapunov stability theory and linear matrix inequality (LMI), the closed-loop system is asymptotically stable is given the sufficient conditions and the method of calculating the fault detection filter gain matrix. Simulation example is given to prove the fault detection filter is designed by the residual error of system for faults with sensitivity, and has robustness to external disturbance inputs.

Keywords: non-linear networked control systems; time varying sample period; multi-packet transmission; fault detection; robust

0 引言

网络控制系统 (NCSs) 具有易于安装、远程操作、维护方便、成本低、结构灵活等优点^[1-2], 因而广泛应用于航空航天、自动化生产、交通通讯等控制领域。但是在 NCSs 中, 由于网络的不确定性以及网络诱导时延、数据丢包、网络带宽的限制、噪声干扰等问题的引入都将会对系统的性能产生影响, 使得系统发生故障的可能性增加, 甚至会导致系统不稳定, 而应用于传统控制系统的控制理论也必须经过重新评估验证后才能应用于 NCSs 中。系统运行的安全性和可靠性极其重要, 如何合理设计 NCSs, 解决由 NCSs 的引入所带来的这些问题已经受到学者们的重视, 目前针对线性 NCSs 中存在网络诱导时延、数据包丢失以及通讯限制的故障检测问题的研究已经取得了相当丰富的研究成果, 在非线性 NCSs 的研究也取得了一些

成果。

文献 [3] 对存在随机丢包的非线性 NCSs 进行研究, 设计一种基于观测器的故障检测滤波器, 同时给出故障检测策略; 文献 [4] 针对存在随机丢包的非线性 NCSs 运用基于 T-S 模型的方法将其线性化, 然后运用模糊观测器给出了使闭环系统渐近稳定的充分条件。文献 [5] 对存在随机时延的非线性 NCSs, 提出一种时延补偿和运用神经网络算法预测状态向量的新的控制策略。文献 [6] 对存在 Markov 时延特性的非线性 NCSs, 采用 T-S 模糊模型将其线性化, 提出基于滑模状态观测器的故障检测方法。文献 [7] 基于 T-S 模型方法, 对具有随机时延的非线性 NCSs 建模, 设计模糊状态观测器及基于观测器的故障检测滤波器。

然而针对多包传输、变采样周期的问题无论在线性还是非线性 NCSs 中的研究都比较少。文献 [8] 运用 Jordan 变换, 将具有变采样周期和时延的 NCSs 的故障检测问题转化为 NCSs 结构参数不确定问题。文献 [9] 研究了动态调度控制策略下多包传输的 NCSs 的故障检测问题, 采样周期固定。对传感器到控制器之间存在多包传输的线性 NCSs, 文献 [10] 对此类 NCSs 进行稳定性分析, 并给出了使 NCSs 指数稳定的充分条件。文献 [11] 对存在随机丢包的和变采样周期线性 NCSs 设计了鲁棒 H_∞ 控制器, 文献 [12] 对具有网络诱导时延、数据丢包及时变采样周期的线性 NCSs 进行研究, 通过多目标优化方法, 给出了 H_∞ 控制器设计方法。

收稿日期: 2015-11-12; 修回日期: 2015-12-07。

基金项目: 国家自然科学基金 (61374063, 61403170); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目 (BY2013066-01); 江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助计划; 江苏省“333 工程”中青年科学技术带头人资助计划; 江苏省高校优秀中青年教师境外研修计划。

作者简介: 赵彦 (1989-), 女, 江苏淮安市人, 硕士研究生, 主要从事网络控制系统的故障检测方向的研究。

通讯作者: 王玉龙 (1977-), 男, 山东临沂市人, 博士后, 副教授, 主要从事网络控制系统、故障检测、船舶控制等方向的研究。

从上述文献可以看出,文献 [3-7] 的被控对象为非线性 NCSs,但仅仅考虑时延或丢包的问题,且采样周期是固定的。文献 [8-12] 对线性 NCSs 中存在的多包传输、变采样周期、丢包及时延问题进行研究,并没有考虑到非线性 NCSs。本文针对一类同时存在多包传输和时变采样周期的非线性 NCSs,采用主动时变采样周期的方法将非线性连续 NCSs 离散化,设计故障检测滤波器,给出使系统渐近稳定的充分条件及滤波器增益矩阵的求解方法。

1 系统建模与问题描述

本节主要针对如下所示的非线性连续时不变 NCSs:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_h h(t, x(t)) + E_d d(t) + E_f f(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(t) \in \mathbf{R}^n$ 为状态向量; $u(t) \in \mathbf{R}^m$ 为控制输入; $d(t) \in \mathbf{R}^p$ 为扰动输入且 $d(t) \in L_2[0, \infty)$; $f(t) \in \mathbf{R}^q$ 为故障信号; $y(t) \in \mathbf{R}^r$ 为量测输出信号; A, B, C, B_h, E_d, E_f 为常数矩阵且具有合适维数; $h(t, x(t))$ 为具有 Lipschitz 特性的非线性函数,则:

$$h(t, x(t)) \leq (\kappa x(t)); \quad (2)$$

$$(h(t, x(t)) - h(t, y(t))) \leq (\kappa(x(t) - y(t))) \quad (3)$$

对系统建模作如下说明:

1) 传感器节点为时间驱动,采样周期为在有限集合内切换采样被控对象的状态;控制器和执行为事件驱动。

2) 不考虑网络诱导时延。

3) 传感器到控制器之间的数据传输采用多包传输的方式,控制器到执行器之间的数据传输采用单包传输方式,且不考虑时序错乱。

4) 在控制器接收端设置缓存单元,每一个数据包都被标识,缓存单元能够识别标识,保证对应的缓存单元得到更新。

首先考虑利用主动时变采样周期的方法将非线性连续被控对象离散化^[13]得到离散事件的非线性时不变 NCSs 的模型:

$$\begin{cases} x(k+1) = \varphi_1 x(k) + \varphi_2 u(k) + \varphi_3 d(k) \\ \quad + \varphi_4 f(k) + \varphi_5 h(k, x(k)) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$\varphi_j = A_j + D_j F_{k,h} E_j, \quad j = 1, 2, \dots, 5.$$

$$A_1 = e^{Ad_1}, D_1 = e^{Ad_1} A, E_1 = I$$

$$A_2 = \int_0^{d_1} e^{As} ds B, D_2 = e^{Ad_1}, E_2 = B$$

$$A_3 = \int_0^{d_1} e^{As} ds E_d, D_3 = e^{Ad_1}, E_3 = E_d$$

$$A_4 = \int_0^{d_1} e^{As} ds E_f, D_4 = e^{Ad_1}, E_4 = E_f$$

$$A_5 = \int_0^{d_1} e^{As} ds B_h, D_5 = e^{Ad_1}, E_5 = B_h$$

$$F_{k,h} = \int_0^{h_k - d_1} e^{As} ds, \quad h = 1, 2, 3$$

针对上述被控对象(4),考虑前馈通道,即传感器到控制器之间采用多包传输方式,传感器输出数据被封装为大小不同且带有标识的 p 个数据包。假设根据调度规则,每个采样周期只能有一个数据包传输到控制器,考虑到数据的实时性,未被

传输的数据包将被丢弃。假设第 k 个采样周期第 $i(i \in 1, 2, \dots, p)$ 个数据包被传输到控制器,定义对角矩阵 $v_i = \text{diag}(v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^p)$,此时,对角矩阵 v_i 中对应的子块应满足 $v_i^j = I_{m \times m}$,每个数据包内数据的维数为 $m = n/p$,其余未被传输的子块按零处理。因此得到控制器数据为 $v_i y(k)$,考虑未被传输的控制量用前一个采样周期的值代替。则有:

$$\tilde{y}(k) = v_i Cx(k) + (I_n - v_i)Cx(k-1)$$

针对上面所描述的 NCSs,构造如下形式的故障检测滤波器:

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A_1 \hat{x}(k) + A_2 \hat{u}(k) + A_3 h(k, \hat{x}(k)) \\ \quad + L_i (\tilde{y}(k) - \hat{y}(k)) \\ \hat{y}(k) = v_i Cx(k) + (I_n - v_i)C\hat{x}(k-1) \end{cases} \quad (5)$$

定义系统的残差为 $r(k) = \tilde{y}(k) - \hat{y}(k)$,状态估计误差为 $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$,上述系统控制器的控制律为: $u(k) = K\hat{x}(k)$ 。

根据上式,可以得到如下闭环控制系统:

$$\begin{cases} \xi(k+1) = \Pi_{i,h} \xi(k) + \Pi_{2,h} \omega(k) + \Pi_{3,h} h(k) \\ r(k) = v_i C e(k) + (I_n - v_i)C e(k-1) \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$A_j = D_j F_{k,h} E_j, \quad \Gamma_i = v_i C, \quad \Psi_i = (I_n - v_i)C,$$

$$\omega^T(k) = [d^T(k) \quad f^T(k)]^T, \quad \xi^T(k) = [x^T(k) \quad e^T(k) \quad e^T(k-1)]^T, \quad \tilde{h}(k) = h(k, x(k)) - h(k, \hat{x}(k)),$$

$$h^T(k) = [h^T(k, x(k)) \quad \tilde{h}^T(k)]^T,$$

$$\Pi_{i,h} = \begin{bmatrix} \varphi_1 + \varphi_2 K & -\varphi_2 K & 0 \\ \Lambda_1 + \Lambda_2 K & A_1 - \varphi_2 K - L_{i,h} \Gamma_i & -L_{i,h} \Psi_i \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Pi_{2,h} = \begin{bmatrix} \varphi_3 & \varphi_4 \\ \varphi_3 & \varphi_4 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Pi_{3,h} = \begin{bmatrix} \varphi_5 & 0 \\ \Lambda_5 & A_5 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

要求在存在多包传输、时变采样周期和未知输入的网络控制系统中设计故障检测滤波器使系统不仅能够满足 H_∞ 性能指标,并且设计的滤波器在故障发生时能够通过残差评价函数快速检测出故障。可利用如下方法解决:在零初始条件下,设计如上式(5)所示的基于观测器的故障检测滤波器,当 $\omega(k) = 0$ 时,能够保证闭环控制系统(6)是渐近稳定的;在有故障发生时,即 $\omega(k) = L_2[0, \infty)$ 时设计的故障检测系统能够满足如下式所示的 H_∞ 性能指标:

$$E\left\{ \sum_{k=0}^{\infty} r^T(k) r(k) \right\} \leq \gamma^2 E\left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \omega^T(k) \omega(k) \right\} \quad (7)$$

选择合适的残差评价函数确定阈值,采用阈值逻辑法来判断故障发生。

选取的残差评价函数如下式所示:

$$J(r(k)) = (r)_T = \frac{1}{T} \sqrt{\sum_{k=t_1}^{t_2} r^T(k) r(k)}, \quad T = t_2 - t_1 + 1 \quad (8)$$

其中 t_1, t_2 分别为初始评价时刻、结束评价时刻, T 为评价步长。

选择如下的阈值函数

$$J_{th} = \sup_{\omega(k) \in L_2, f(k)=0} (r)_T \quad (9)$$

由于上述不等式 (16) 中同时存在 P^{-1}, P, Q^{-1}, Q , 因此不等式 (16) 为非线性矩阵不等式。

定义: $S = \text{diag}(P, Q, I, I, \dots, I)$, 对式 (16) 进行等价变

换, 分别左乘 S^T , 右乘 S , 并令 $M_{i,h} = L_{i,h}^T Q$, 可以得到线性矩阵不等式 (11)。

当 $\omega(k) = 0$ 时, 由 Schur 补定理可得:

$$E\{\Delta V(k)\} = E\{V(k+1)\} - E\{V(k)\} < 0 \quad (17)$$

由此可证系统渐近稳定。证毕。

3 仿真实例

考虑非线性连续 NCSs (1), 给出具有 Lipschitz 特性的非线性连续 NCSs 的参数如下:

$$A = \begin{bmatrix} -9.0605 & 1.3271 \\ -2.9086 & -10.6470 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -1.3603 & -0.0385 \end{bmatrix}^T,$$

$$B_h = \begin{bmatrix} -3.9065 & 1.1258 \end{bmatrix}^T$$

$$E_d = \begin{bmatrix} 4.3211 & 5.1603 \end{bmatrix}^T, E_f = \begin{bmatrix} 13.603 & 0.385 \end{bmatrix}^T h(k),$$

$$x(k) = 0.1 \sin x(k)$$

根据上述给定的系统, 取 $p = 2$ 。本文采用主动变采样周期, 假设传感器可允许的最大采用周期和最小采样周期分别为 $d_1 = 0.01, d_2 = 0.015$, 采样周期在 $0.011 \text{ s}, 0.013 \text{ s}, 0.015 \text{ s}$ 内切换, 即 $h = 3$ 。假设系统的初始状态为: $\zeta^T(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。干扰 $d(t)$ 的最大幅值为 0.5 , 原系统的控制律为: $K = [0.7159 \ -0.0284]$ 。扰动输入和故障信号分别为:

$$d(k) = 0.5 \sin(0.5k), k = 0, 1, 2, \dots, 300$$

$$f(k) = \begin{cases} 2 \sin(\exp(0.02k)), & k = 100, 101, \dots, 200. \\ 0, & \text{other} \end{cases}$$

利用 Matlab 求得故障检测滤波器的增益矩阵 $L_{i,h}$ 为:

$$L_{1,1} = \begin{bmatrix} 1.3049 & 0.0159 \\ -0.2964 & -0.0028 \end{bmatrix},$$

$$L_{1,2} = \begin{bmatrix} 1.0148 & 0.0231 \\ -0.3030 & -0.0042 \end{bmatrix},$$

$$L_{1,3} = \begin{bmatrix} 0.9843 & 0.0349 \\ -0.3095 & -0.0064 \end{bmatrix},$$

$$L_{2,1} = \begin{bmatrix} -0.0109 & -3.8427 \\ 0.0040 & 1.1056 \end{bmatrix},$$

$$L_{2,2} = \begin{bmatrix} -0.0158 & -3.7207 \\ 0.0060 & 1.0769 \end{bmatrix},$$

$$L_{2,3} = \begin{bmatrix} -0.0199 & -3.4947 \\ 0.0081 & 1.0341 \end{bmatrix}$$

利用 Matlab 仿真, 可以看出在有故障和正常情况下的残差信号如图 (1) 所示, 当故障在 $k = 100$ 时刻发生时, 残差信号 $r(k)$ 有明显的变化。残差评价函数和阈值如图 (2) 所示, 由图 (2) 可以看出, 故障发生时, 残差评价函数快速的超过阈值, 使用本文提出的方法, 阈值为 $J_{th} = 1.061$, $J(r(105)) = 0.9033, J(r(106)) = 1.125$ 。可以得到故障出现 6 步后被检测到。仿真结果表明本文设计的故障检测系统能快速检测到故障的发生, 同时对外界干扰信号具有良好的鲁棒性, 验证了该方法的可行性与有效性。

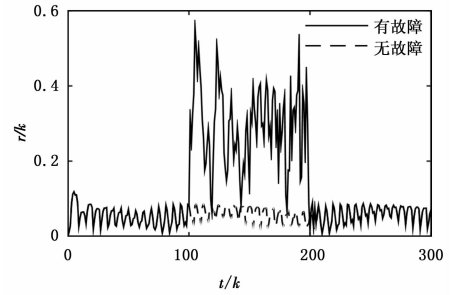


图 1 残差信号

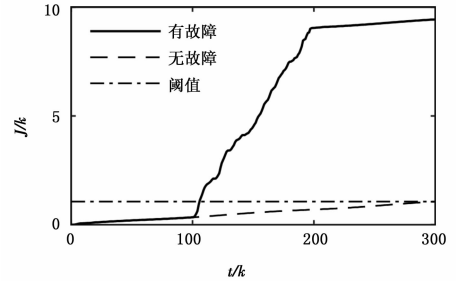


图 2 残差评价函数

4 结束语

本文针对具有多包传输和变采样周期的非线性连续 NCSs, 采用动态调度策略和主动变采样周期的方法将非线性连续 NCSs 转化为具有 $p \times h$ 个子系统的离散切换系统模型。针对该类系统的故障检测问题, 设计基于观测器的故障检测滤波器, 并运用 Lyapunov 稳定性理论和 LMI 技术给出使闭环系统渐近稳定的条件及故障检测滤波器增益的求解方法。最后运用仿真算例说明了故障检测滤波器的残差产生系统对故障具有敏感性, 同时对外部扰动输入具有鲁棒性。

网络诱导时延、数据丢包及通讯限制是 NCSs 普遍存在的问题, 然而在具有时变采样周期的非线性连续 NCSs 中考虑这些因素, 尤其是时延的引入会增加系统建模的难度; 另外, 在多包传输中考虑随机丢包的问题也将使系统的建模变得更加复杂, 这是作者进一步需要去研究的问题。

参考文献:

[1] Qin Y, S. Stability of networked control systems with packet drop-out: an average dwell time approach [J]. Iet Control Theory & Applications, 2011, 5 (1): 47-53.

[2] 王红茹. 动态系统的鲁棒故障检测与分离方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

[3] 罗小元, 李娜, 徐奎, 等. 具有随机丢包的非线性网络化控制系统鲁棒故障检测 [J]. 控制与决策, 2013, 10 (10): 1596-1600.

[4] 马晔, 崔宝同. 非线性网络控制系统的故障诊断 [J]. 计算机工程与设计, 2012, 33 (4): 1329-1332.

[5] Chai R, Dong L, Zhang B, et al. Design and Stability Analysis of Nonlinear Networked Control Systems with Random Delay Based on Neural Network [A]. Proceedings of the 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC) [C]. 2012: 523-528.

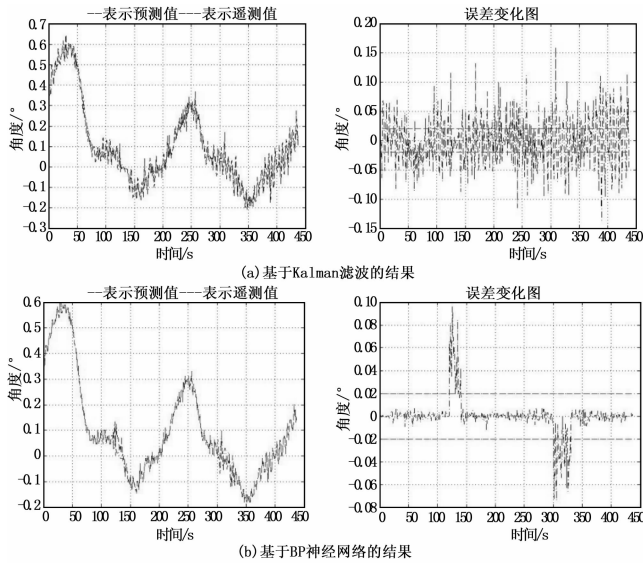


图 3 红外地球敏感器诊断结果

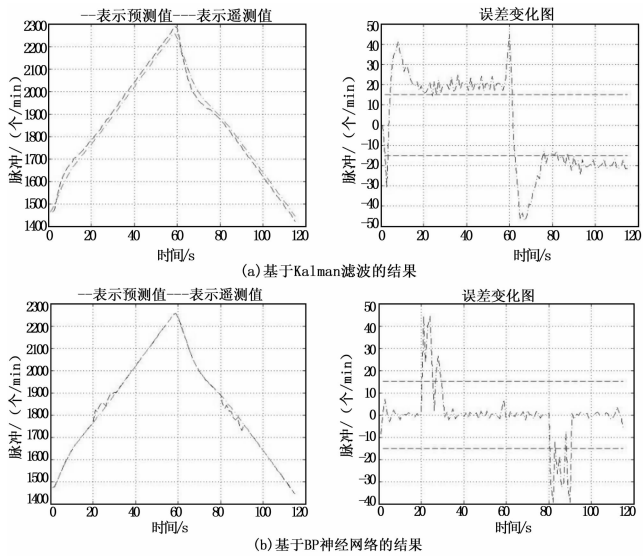


图 4 动量轮脉冲诊断结果

滤波的方法预测出遥测数据的期望值与真实遥测数据的误差较大, 红外滚动估值的预测误差在 0.1° 左右, 动量轮脉冲的预测误差在 40 个/min 脉冲左右。由图可知, 利用设定的阈值 0.02° 和 15 个/min 无法对测试样本集中遥测数据微小的误差

进行诊断。相对于基于 Kalman 滤波的方法, 基于 BP 神经网络的方法能够准确地预测出遥测数据的期望值, 红外滚动估值的预测误差在 0.01° 以内, 动量轮脉冲的预测误差在 8 个/min 脉冲以内; 通过设定的诊断阈值 0.02° 和 15 个/min, 能够准确地诊断出异常故障。

从而证明了本文建立的 BP 神经网络模型是可靠且有效的。利用故障诊断阈值, 本文方法能够有效地对卫星的故障进行诊断。经分析, 预测误差主要来自于神经网络训练样本不足造成的神经网络训练不充分, 利用实时在线故障诊断子系统中更新的神经网络自主学习能力可以减小预测误差。

4 结论

本文通过对卫星遥测数据的特性分析, 利用 BP 神经网络来挖掘其中隐藏的规律, 并构建了基于 BP 神经网络的卫星故障诊断系统。利用红外地球敏感器和动量轮的遥测数据对算法进行验证, 与基于 Kalman 滤波的方法相比, 本文方法能够有效地、准确地对卫星故障进行诊断。由于神经网络的自学习功能, 神经网络模型会随着遥测数据的增多而不断提高预测精度, 这会进一步提高卫星故障诊断的准确性。为了将本文方法应用于实际测试过程中, 后续需要解决从知识库的大量神经网络模式中快速查询相应模型的问题。

本文方法应用于卫星的故障诊断, 能够提高卫星测试的智能性、自主性与实时性。同时, 本文的方法对于卫星的在轨自主管理具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 冯文婧, 潘宇倩, 白东炜. 应用层次分析法的航天器健康评估方法 [J]. 航天器工程, 2014, 23 (2): 12-18.
- [2] 朱维宝, 李砥擎, 孙波. 人工智能技术在航天器数据监视中的应用研究 [J]. 航天器工程, 2007, 16 (3): 94-98.
- [3] 岑朝辉, 魏蛟龙, 蒋睿. Elman 神经网络的红外地球敏感器实时故障诊断 [J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30 (5): 504-509.
- [4] Satish Kumar. 神经网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [5] 张芝兰. BP 神经网络研究及其在个人信用评估中的应用 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [6] 张旭东, 李运泽. 基于 BP 神经网络的纳卫星轨道温度预测 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34 (12): 1423-1427.
- [7] 邓建国, 罗隆福. 基于 BP 神经网络的大型水轮发电机定子铁心的温度预测 [J]. 湖南大学学报, 2000, 27 (1): 72-75.
- [8] 郭阳明, 冉从宝, 姬昕禹, 等. 基于组合优化 BP 神经网络的模拟电路故障诊断 [J]. 西北工业大学学报, 2013, 31 (1): 44-48.
- [9] 吕明, 吴晓蓓, 陈庆伟, 等. 多包传输网络控制系统的鲁棒 H_∞ 故障检测 [J]. 控制与决策, 2008, 23 (2): 221-224.
- [10] 杨业, 王永骥. 一类多包传输网络控制系统的设计及稳定性分析 [J]. 2005, 34 (2): 129-132
- [11] Li YH, Zhang Y. Robust H_∞ Control for NCS with Time-varying Sampling Period and Random Packet Dropouts [J]. Computing Technology & Automation, 2013.
- [12] Zhang Q, Li Y, Zhang Y, et al. H_∞ controller design of networked control systems with time-varying sampling periods [A]. Proceedings of 2010 Chinese Control and Decision Conference [C]. 2010: 145-149.
- [13] Zhang HL, Jing YW, Zhang SY. Controller design for networked control systems with active varying sampling period [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21 (22): 7275-7280.

(上接第 58 页)

- [6] Mao Z H, Jiang B. Sliding mode observer - based fault estimation for nonlinear networked control systems [A]. Proceedings of the 27th Chinese Control Conference [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 47-51.
- [7] Zhu Z, Jiao X. Fault detection for nonlinear networked control systems based on fuzzy observer [J]. Journal of Systems Engineering & Electronics, 2012, 1 (1): 129-136.
- [8] 樊金荣, 方华京. 具有时变采样周期的网络化控制系统故障检测 [J]. 计算机工程, 2013, 3 (3): 289-294.
- [9] 吕明, 吴晓蓓, 陈庆伟, 等. 多包传输网络控制系统的鲁棒 H_∞ 故障检测 [J]. 控制与决策, 2008, 23 (2): 221-224.