

带滤波的无线传感器网络的 H_∞ 控制

吴 博¹, 关治洪^{1†}, 詹习生^{1,2}, 张先鹤²

(1. 华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074; 2. 湖北师范学院 机电与控制工程学院, 湖北 黄石 435002)

摘要: 本文研究了基于滤波的无线传感器网络的 H_∞ 控制问题. 首先建立了无线传感器网络的模型, 然后使用稳态Kalman滤波器对多个传感器节点的输出信号进行滤波, 将滤波后的信号作为无线传感器网络系统的反馈输出, 并通过建模和分析得到带干扰的线性离散切换系统模型. 最后设计了切换控制器, 并基于Lyapunov函数给出了在任意切换条件下使该切换系统满足 H_∞ 控制的条件. 仿真结果验证了该方法和结果的可行性.

关键词: 切换系统; 滤波; H_∞ 控制; Lyapunov函数

中图分类号: TP202.1; TP212.9 **文献标识码:** A

H-infinity control of wireless sensor networks with filtering

WU Bo¹, GUAN Zhi-hong^{1†}, ZHAN Xi-sheng^{1,2}, ZHANG Xian-he²

(1. Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China;

2. College of Mechatronics and Control Engineering, Hubei Normal University, Huangshi Hubei 435002, China)

Abstract: We investigate the H-infinity control of wireless sensor networks based on filtering. First we propose a model for the wireless sensor networks; and then, we apply the steady-state Kalman filter to the output signals of multiple sensor nodes. The obtained signals are considered as the feedback output of wireless sensor networks. By modeling and analyzing, we develop the switching model of the linear discrete-time system with disturbances. Finally, the switching controller is designed. By using Lyapunov function, we develop sufficient conditions of H-infinity control for the linear switched systems with any switching rule. The simulation demonstrates the feasibility of the method and results obtained.

Key words: switched system; filtering; H-infinity control; Lyapunov function

1 引言(Introduction)

无线传感器网络是通过无线网络将传感器节点和节点连接起来的分布式系统. 大量传感器节点将各自周围环境中采集到的信息通过单跳通信或多跳通信的方式传递给无线传感器网络中的控制器节点, 控制器节点利用从传感器节点处传来的信息得到控制信号, 对执行器进行操作, 从而达到对传感器节点周围环境进行调节的目的^[1-2].

在无线传感器网络的实际应用中, 人们主要面临着无线通信的不可靠性和传感器节点的低性能等问题. 由于无线通信中存在的多普勒频移、路径损耗、多径衰落、相邻信道干扰和半双工操作等^[3], 这就使得传感器节点的信号在通信过程中的精确度不高; 另外, 由于传感器节点的低成本以及低功耗等问题, 使得传感器节点的测量精度也很难达到控制要求. 因此, 在对无线传感器网络进行控制研究时有必要考虑通信过程中信号滤波问题^[4]. 本文通过建立无线传感器网络子系统信息滤波模型的方法, 基于Kalman滤波得到系统的输出反馈, 从而将无线传

感器网络的稳定性问题转化为一个带干扰线性随机切换系统的 H_∞ 控制问题^[5], 并用Lyapunov函数方法得出使线性随机切换系统满足 H_∞ 控制的充分条件.

2 问题的描述(Problem formulation)

2.1 无线传感器网络控制模型(Control models of wireless sensor networks)

无线传感器网络系统结构如图1所示. 考虑线性离散系统模型

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \\ y_i(k) = C_i x(k), \\ z_i(k) = D_i x(k) + v_i(k), \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 是系统的状态, $y_i(k) \in \mathbb{R}^n$ 是第 i 个传感器节点的实际输出($i = 1, 2, \dots, M$, M 是传感器节点总数), $z_i(k) \in \mathbb{R}^n$ 是第 i 个传感器节点的观测输出, $u(k) \in \mathbb{R}^m$ 是系统的控制输入, $v_i(k) \in \mathbb{R}^n$ 是均值为0、方差为 R_i 且相互独立的高斯噪声. $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $D_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是常系数矩阵, 且矩阵 C_i 可逆.

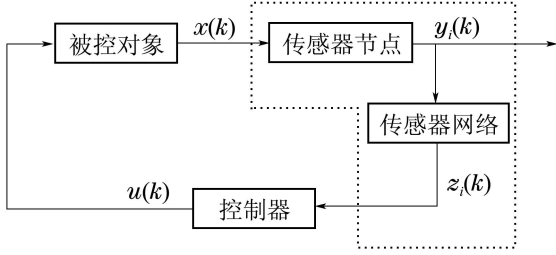


图1 无线传感器网络系统结构图

Fig. 1 System structure of wireless sensor network

2.2 无线传感器网络滤波模型(Filtering models of wireless sensor networks)

由于在信号单跳或多跳的传输路径中受到外部噪声干扰以及传感器节点自身的测量精度等原因,会造成控制器接收到的信号与实际有偏差,为得到能够准确反映被控区域的状态观测,本文提出采用滤波的方法对多个传感器节点的信号进行滤波.考虑无线传感器网络中信号的不连续性,本文先建立一个比较常见的无线传感器网络滤波模型,并采用稳态Kalman滤波理论方法得到多个传感器节点滤波信号,然后采用系数加权的方法得到多个传感器的最优融合信号.如图1点线部分所示,将多个传感器节点处输出信息作为子系统的状态信息,首先根据式(1),可得由输出方程和量测方程组成的子系统模型为

$$\begin{cases} y_i(k+1) = \varphi_i y_i(k) + \Gamma_i u(k), \\ z_i(k) = H_i y_i(k) + v_i(k), \end{cases} \quad (2)$$

其中: $y_i(k) \in \mathbb{R}^n$ 是第 i 个子系统状态, $z_i(k) \in \mathbb{R}^n$ 是第 i 个子系统的观测输出, $\varphi_i = C_i A C_i^{-1} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\Gamma_i = C_i B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $H_i = D_i C_i^{-1} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为常数矩阵.

引理 1 根据稳态Kalman滤波理论^[6], 系统(2)的第 i 个子系统的滤波器为

$$\begin{cases} \hat{y}_i(k) = (I_n - \hat{K}_i H_i) \varphi_i \hat{y}_i(k-1) + \hat{K}_i z_i(k), \\ \hat{K}_i = \Sigma_i H_i^T [H_i \Sigma_i H_i^T + R_i]^{-1} \\ P_i = [I_n - \hat{K}_i H_i] \Sigma_i, \end{cases}$$

其中 $\hat{K}_i$ 和 P_i 分别为稳态滤波的系数矩阵和预报误差方差阵. 若矩阵 $Q \in \mathbb{R}^{m \times m}$ 是子系统(2)中 $u(k)$ 的方差阵, 那么 Σ_i 是如下Riccati方程的唯一正定解:

$$\Sigma_i = \varphi_i [\Sigma_i - \Sigma_i H_i^T (H_i \Sigma_i H_i^T + R_i)^{-1} H_i \Sigma_i] \varphi_i^T + \Gamma_i Q \Gamma_i^T.$$

引理 2 在不考虑各子系统状态相关性的条件下, 按方差阵的迹加权最优融合准则^[7], 各子系统的状态最优信息融合为

$$\bar{y}(k) = \sum_{i=1}^M a_i \hat{y}_i(k), \quad (3)$$

其中: $a_i = \frac{1}{\text{tr } P_i} (\sum_{i=1}^M \frac{1}{\text{tr } P_i})^{-1}$ 为最优融合系数, tr 表示矩阵的迹.

3 无线传感器网络的 H_∞ 控制 (H_∞ control of wireless sensor networks)

考虑无线传感器网络中 M 个输出信号的最优信息融合问题, 通过引理1中的稳态Kalman滤波理论和引理2中的最优信息融合准则可以得到多个传感器节点的最优融合输出 $\bar{y}(k)$, 并且作为离散系统(1)的输出反馈控制信号

$$u(k) = K_{\sigma(k)} \bar{y}(k), \quad (4)$$

其中: $u(k) \in \mathbb{R}^m$ 是控制器的输出信号, $K_{\sigma(k)}$ 是控制器增益, $\sigma(k) \in \{1, \dots, l\}$, l 是执行器节点的个数, 为了对这 l 个分布不同的执行器节点分别进行控制, 引入切换控制的方法. 方便起见, 记 $u(k) = u_k$, 其余类推.

由式(3)和式(4)可得系统(1)的输出反馈控制器为

$$u(k) = K_{\sigma(k)} \sum_{i=1}^M a_i \hat{y}_i(k). \quad (5)$$

将式(5)代入离散系统(1)的状态方程中可得

$$x(k+1) = Ax(k) + BK_{\sigma(k)} \sum_{i=1}^M a_i \hat{y}_i(k).$$

根据系统(1)中的传感器的观测输出, 可知第 i 个子系统的滤波器为

$$\begin{aligned} \hat{y}_i(k) &= (I_n - \hat{K}_i H_i) \varphi_i \hat{y}_i(k-1) + \\ &\quad \hat{K}_i D_i x(k) + \hat{K}_i v_i(k). \end{aligned} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可得系统(1)的状态方程为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + BK_{\sigma(k)} \sum_{i=1}^M a_i \hat{K}_i D_i x(k) + \\ &\quad BK_{\sigma(k)} \sum_{i=1}^M a_i (I_n - \hat{K}_i H_i) \varphi_i \hat{y}_i(k-1) + \\ &\quad BK_{\sigma(k)} \sum_{i=1}^M a_i \hat{K}_i v_i(k). \end{aligned}$$

令增广状态向量为

$$\tilde{x}_k = [x^T(k) \ \hat{y}_1^T(k-1) \ \dots \ \hat{y}_M^T(k-1)]^T,$$

这时 $\tilde{x}_k \in \mathbb{R}^{n \times (M+1)}$, 则闭环系统的状态方程为

$$\tilde{x}_{k+1} = (\tilde{A} + \tilde{B} K_{\sigma(k)} L) \tilde{x}_k + \beta_{\sigma(k)} k, \quad (7)$$

其中:

$$L = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^M a_i D_i^T \hat{K}_i^T \\ a_1 \varphi_1^T (I_n - \hat{K}_1 H_1)^T \\ a_2 \varphi_2^T (I_n - \hat{K}_2 H_2)^T \\ \vdots \\ a_M \varphi_M^T (I_n - \hat{K}_M H_M)^T \end{pmatrix}^T,$$

$$\beta_{\sigma(k)k} = \begin{pmatrix} BK_{\sigma(k)} \sum_{i=1}^M a_i \hat{K}_i v_{ik} \\ \hat{K}_1 v_{1k} \\ \hat{K}_2 v_{2k} \\ \vdots \\ \hat{K}_M v_{Mk} \end{pmatrix},$$

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} A & 0 \\ \hat{K}_1 D_1 & (I_n - \hat{K}_1 H_1) \varphi_1 \\ \hat{K}_2 D_2 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \hat{K}_M D_M & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \\ (I_n - \hat{K}_2 H_2) \varphi_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & (I_n - \hat{K}_M H_M) \varphi_M \end{pmatrix},$$

$$\tilde{B} = [B^T \ 0 \ 0 \ \cdots \ 0]^T.$$

为了便于讨论, 将式(7)写成下面形式:

$$\tilde{x}(k+1) = \hat{A}_{\sigma(k)} \tilde{x}(k) + \beta_{\sigma(k)}(k), \quad (8)$$

其中: $\hat{A}_{\sigma(k)} = \tilde{A} + \tilde{B} K_{\sigma(k)} L$, $\sigma(k)$ 为切换信号, $\sigma(k) \in \{1, 2, \dots, l\}$, 当 $\sigma(k) = i$ 时, 表示系统切换到第 i 个子系统, $\beta_{\sigma(k)}(k)$ 是线性闭环切换系统(8)的干扰信号.

为了研究线性切换系统(8)的H_∞性能, 下面给出闭环切换系统可观测输出的假设.

假设 1 若 $\tilde{y}_i(k)$ 为闭环切换系统第 i 个子系统的可观测输出, 那么

$$\tilde{y}_i(k) = \hat{C}_i \tilde{x}(k), \quad (9)$$

$$\text{其中 } \hat{C}_i = \begin{pmatrix} C_i & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & I \end{pmatrix}.$$

定义 1 指标函数 $\xi(k) = [\xi_1(k) \ \cdots \ \xi_l(k)]^T$, 对于任意 $i = 1, \dots, l$, 定义为^[8]

$$\xi_i(k) = \begin{cases} 1, & \text{当时刻 } k \text{ 系统切换到第 } i \text{ 个子系统时,} \\ 0, & \text{其他情况.} \end{cases}$$

根据定义1, 闭环切换系统(8)可以描述成

$$\begin{cases} \tilde{x}(k+1) = \sum_{i=1}^l \xi_i(k) (\hat{A}_i \tilde{x}(k) + \beta_i(k)), \\ \tilde{y}_i(k) = \hat{C}_i \tilde{x}(k), \end{cases} \quad (10)$$

其中 $\hat{A}_i$ 是闭环切换系统第 i 个子系统的系统矩阵.

定义 2 给定一个H_∞性能指标 $\gamma > 0$, 满足下

列条件^[5]:

1) 当系统(10)初始状态 $\tilde{x}(0) = 0$ 时, 有

$$\|\tilde{y}_i(k)\| < \gamma \|\beta_i(k)\|. \quad (11)$$

2) 当 $\beta_i(k) \equiv 0$ 时, 系统(10)是渐近稳定的, 则称系统(10)满足H_∞控制准则, 其中范数由离散L₂[0, +∞)空间的内积定义.

定理 1 若存在 l 个对称正定矩阵 $G_1, \dots, G_l$, 常数 $\gamma > 0$ 使得下面一簇线性矩阵不等式成立:

$$\begin{pmatrix} \hat{A}_i^T G_j \hat{A}_i - G_i + \gamma^{-1} \hat{C}_i^T \hat{C}_i & \hat{A}_i^T G_j \\ G_j \hat{A}_i & G_j - \gamma I \end{pmatrix} < 0, \quad (12)$$

则存在输出反馈控制器(4)使得闭环系统(10)满足H_∞控制准则.

证 对闭环系统(10), 构造Lyapunov函数

$$V(k, \tilde{x}_k) = \tilde{x}_k^T G(\xi_k) \tilde{x}_k = \tilde{x}_k^T \left(\sum_{i=1}^l \xi_{ik} G_i \right) \tilde{x}_k,$$

则 $V(k, \tilde{x}(k))$ 的差分为

$$\Delta V = V(k+1, \tilde{x}_{k+1}) - V(k, \tilde{x}_k) = \tilde{x}_{k+1}^T G(\xi_{k+1}) \tilde{x}_{k+1} - \tilde{x}_k^T G(\xi_k) \tilde{x}_k.$$

考虑到闭环切换系统(10)的切换信号 $\sigma(k)$ 是任意的, 当 k 时刻离散系统随机切换到第 i 个子系统时, 系统(10)中的性能指标函数等价于如下形式:

$$\begin{cases} \xi_i(k) = 1, \ \xi_{l \neq i}(k) = 0, \\ \xi_j(k+1) = 1, \ \xi_{l \neq j}(k+1) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13), 闭环系统(10)的差分方程重写如下:

$$\begin{aligned} \Delta V = & \tilde{x}_k^T \hat{A}_i^T G_j \hat{A}_i \tilde{x}_k - \tilde{x}_k^T G_i \tilde{x}_k + (\tilde{x}_k^T \hat{A}_i^T G_j \beta_{ik} + \\ & \beta_{ik}^T G_j \hat{A}_i \tilde{x}_k) + \beta_{ik}^T G_j \beta_{ik}. \end{aligned} \quad (14)$$

根据式(9)和式(11), 对常数 $\gamma > 0$, 设

$$W(\tilde{y}_{ik}, \beta_{ik}) = \gamma \beta_{ik}^T \beta_{ik} - \gamma^{-1} \tilde{x}_{ik}^T \hat{C}_i^T \hat{C}_i \tilde{x}_{ik}. \quad (15)$$

由式(14)和式(15)可得

$$\begin{aligned} \Delta V - W = & [\tilde{x}_k^T \ \beta_{ik}^T] \begin{pmatrix} \hat{A}_i^T G_j \hat{A}_i - G_i + \gamma^{-1} \hat{C}_i^T \hat{C}_i & \hat{A}_i^T G_j \\ G_j \hat{A}_i & G_j - \gamma I \end{pmatrix} \\ & \begin{pmatrix} \tilde{x}_k \\ \beta_{ik} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

根据式(12), 可知

$$\Delta V(k, \tilde{x}_k) - W(\tilde{y}_k, \beta_{ik}) < 0. \quad (16)$$

要使系统(10)满足H_∞控制, 根据定义2中的条件1)可知, 须证明下式成立:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \tilde{y}_{ik}^T \tilde{y}_{ik} - \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{ik}^T \beta_{ik} < 0. \quad (17)$$

当系统初始状态 $\tilde{x}(0) = 0$ 时, 对式(16)迭代可得

$$\sum_{k=0}^{\infty} \Delta V(k, \tilde{x}_k) - \sum_{k=0}^{\infty} W(\tilde{y}_{ik}, \beta_{ik}) = V(\infty) - \sum_{k=0}^{\infty} \gamma \beta_{ik}^T \beta_{ik} + \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^{-1} \tilde{y}_{ik}^T \tilde{y}_{ik} < 0.$$

又 $V(\infty) > 0$, 所以

$$\sum_{k=0}^{\infty} \gamma \beta_{ik}^T \beta_{ik}(k) - \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^{-1} \tilde{y}_{ik}^T \tilde{y}_{ik} > 0.$$

上式左右两边同乘 γ , 可证明式(17)成立. 即闭环系统(10)满足定义2中条件1).

当切换系统的干扰 $\beta_i(k) \equiv 0$ 时, 由式(15)可得

$$W(\tilde{y}_{ik}, \beta_{ik}) = -\gamma^{-1} \tilde{x}_k^T \hat{C}_i^T \hat{C}_i \tilde{x}_k.$$

由于常数 $\gamma > 0$, 所以根据式(16)可知 $\Delta V(k, \tilde{x}_k) < 0$. 因此, 当 $\beta_i(k) \equiv 0$ 时, 由Lyapunov稳定性理论可知系统(10)是渐近稳定的, 即定义2中条件2)成立.

证毕.

4 数据仿真(Simulation)

例1 设无线传感器网络有3个传感器节点, 则线性离散系统模型为

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \\ y_i(k) = C_i x(k), \\ z_i(k) = D_i x(k) + v_i(k), \\ x(0) = [2 \quad -1]^T, \end{cases}$$

其中: $i = 1, 2, 3$,

$$A = \begin{bmatrix} 0.0703 & 0.5215 \\ 0.0604 & 0.1287 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.4545 \\ 0.9364 \end{bmatrix}, C_1 = \begin{bmatrix} 0.9 & 0 \\ 0 & 0.8 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.3 \end{bmatrix}, D_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, D_3 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}.$$

取 H_{∞} 性能指标 $\gamma = 1.42$.

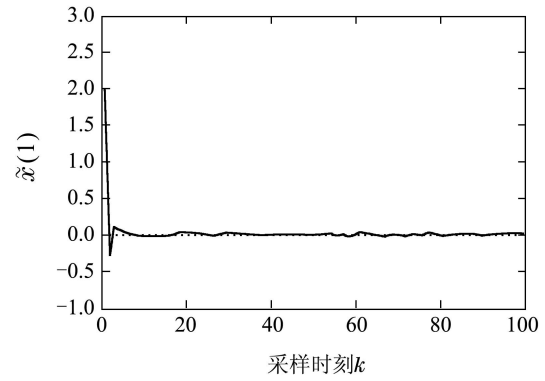
在上述例子中, 利用MATLAB对含有3个传感器节点的无线传感器网络进行仿真验证, 可以得到系统的状态响应曲线如图2所示, 图2中的(a)和(b)分别是系统(10)的状态 $\tilde{x}(1)$ 和 $\tilde{x}(2)$ 在100个采样周期内的状态响应.

经过仿真分析, 当无线传感器网络的闭环输出反馈控制器为

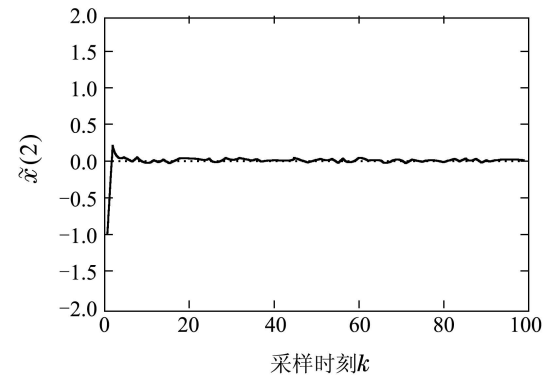
$$K_1 = [0.9590 \quad -3.0497],$$

$$K_2 = [-0.5872 \quad 2.4185]$$

时, 由图2可以看出, 切换系统状态响应能够很快的从各自的初值向平衡点 $\tilde{x}_0 = 0$ 逼近, 说明闭环切换系统在设计的控制器的作用下可以经过很短的时间进入稳定状态.



(a)



(b)

图2 闭环系统状态响应

Fig. 2 State response of closed-loop system

5 结论语(Conclusion)

本文在讨论无线传感器网络控制系统的建模、稳定性和控制器设计问题的基础上, 采用Kalman滤波方法对反馈信号进行最优滤波分析, 并将无线传感器网络稳定性问题转化带干扰的线性离散切换系统 H_{∞} 控制问题, 通过构造Lyapunov函数, 设计出使系统满足 H_{∞} 控制的控制器, 仿真结果验证了研究方法和结果的正确性和可行性.

参考文献(References):

- [1] 崔丽, 鞠海玲, 苗勇. 无线传感器网络研究进展 [J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163 - 174.
(CUI Li, JU Hailing, MIAO Yong, et al. Overview of wireless sensor networks [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2005, 42(1): 163 - 174.)
- [2] AKYILDIZ I F, SU W, SANAKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wirelss sensornetworks: a survey [J]. *Computer Network*, 2002, 38(4): 339 - 422.

- [3] XIA F, TIAN Y C, LI Y J, et al. Wireless sensor/actuator network design for mobile control applications [J]. *Sensors*, 2007, 7(10): 2157 – 2173.
- [4] 尹慧琳, 王磊, 冯占军. 无线传感器网络节点分布式信息融合算法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(17): 18 – 20.
(YI Huilin, WANG Lei, FENG Zhanjun. Research on distributed information fusion algorithm of wireless sensor network nodes [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(17): 18 – 20.)
- [5] 关治洪, 廖俊峰, 廖锐全. 不确定脉冲系统的鲁棒 H_∞ 控制 [J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 623 – 626.
(GUAN Zhihong, LIAO Junfeng, LIAO Ruiquan. Robust H_∞ control of uncertain impulsive systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(4): 623 – 626.)
- [6] 邓自立. 最优滤波理论及应用——现代时间序列分析方法 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000: 191 – 242.
- [7] 邓自立, 祁荣宾. 多传感器信息融合次优稳态Kalman滤波 [J]. 中国学术期刊文摘, 2000, 6(2): 183 – 184.
(DENG Zili, QI Rongbin. Suboptimal steady-state Kalman filter for multisensor information fusion [J]. *Chinese Science Abstracts*, 2000, 6(2): 183 – 184.)
- [8] JAMAL D, PIERRE R, CLAUDE I. Stability analysis and control synthesis for switched systems: a switched Lyapunov function approach [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(1): 1883 – 1887.

作者简介:

吴 博 (1985–), 男, 硕士, 研究方向为无线传感器网络、网络控制系统、鲁棒控制;

关治洪 (1955–), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂网络、网络控制、脉冲切换系统、多智能体群集动力学等, E-mail: zhguan@mail.hust.edu.cn;

詹习生 (1979–), 男, 博士, 讲师, 研究方向为网络控制系统、鲁棒控制、迭代学习控制;

张先鹤 (1963–), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为网络控制系统、工业过程先进控制及应用.