

基于模糊模型的无线网络控制系统故障检测

张捷¹, 薄煜明¹, 吕明²

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094;

2. 南京北方信息产业集团有限公司, 江苏 南京 211153)

摘要: 考虑控制器与被控对象之间采用无线传输, 且被控对象为非线性模型的一类网络控制系统, 对其进行故障检测。首先基于 T-S 模糊模型将对象线性化, 利用模糊主导子系统规则, 设计了模糊观测器, 并得出了观测器误差方程。然后将误差方程等效为与无线传输跳数相关的离散切换系统, 并证明了误差系统的稳定性。最后, 通过仿真实例验证了所提方法的有效性。

关键词: 无线传输; 非线性; 网络控制系统; 模糊模型; 故障检测

中图分类号: TP 271

文献标志码: A

Fault detection of wireless networked control systems based on fuzzy model

ZHANG Jie¹, BO Yu-ming¹, LÜ Ming²

(1. School of Automation, Nanjing Univ. of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Nanjing North Information Industry Group Ltd., Nanjing 211153, China)

Abstract: Considering a class of networked control systems using wireless transmission between the controller and the controlled object with nonlinear models, the fault detection is carried out. Firstly, based on a T-S fuzzy model, the object is linearized. The fuzzy observer is designed and the error equation of the observer is given by using the fuzzy dominant subsystem rule. Secondly, the error equation is equivalent to the discrete switched system related to the hop count of the wireless transmission, and the stability of the error system is proved. Finally, a simulation is given to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: wireless transmission; nonlinear; networked control system; fuzzy model; fault detection

0 引言

网络控制系统(networked control systems, NCS)是利用网络作为信息传输通道的闭环控制系统^[1-7]。根据控制器与被控对象之间采用的物理层传输方式的不同, 网络控制系统总体上可以分为有线网络控制系统和无线网络控制系统。在过去的研究中, 有线网络控制系统已经被广泛讨论, 并取得了丰富的成果^[8-9]。例如, 文献[8]考虑了具有传输时延的情况下, 有线网络控制系统的控制和稳定性问题。文献[9]则研究了具有外部干扰且发生故障时, 有线网络控制系统的故障检测问题。

相对于有线传输方式, 无线网络控制系统的研究相对匮乏^[10-11]。实际上, 采用无线传输是工程中常用的方式之一。它无需事先铺设线路, 网络节点的可移动性好, 特别适合于实时性要求不高的场合。无线网络控制系统的网络时延主要与数据报文在无线网络中的转发次数(或称跳数, hop count)有关。

本文研究了一类无线网络控制系统的故障检测问题, 并假定被控对象为非线性模型。利用模糊模型将对象线性

化为一系列局部线性模型, 设计了基于模糊主导子系统的观测器, 并将观测器误差方程等效为离散切换系统, 其自主切换与无线传输的跳数有关, 证明了误差系统的稳定性。

1 问题描述

当控制器与被控对象之间采用无线网络时, 其系统结构如图 1 所示。

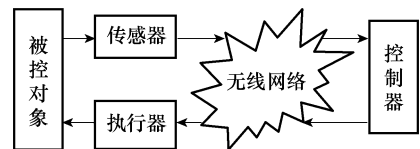


图 1 无线网络控制系统结构

假定无线通信采用基于 IEEE 802.11b 协议的无线局域网, 并利用多跳中继的方式实现数据报文的长距离转发。此时, 时延的度量主要与数据包的转发次数(跳数)有关。

考虑该网络控制系统的被控对象为非线性模型

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{v}(t)) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_f \mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$ 为状态向量; $\mathbf{v}(t) \in \mathbf{R}^m$ 为输入向量; $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{R}^l$ 为输出向量; $\mathbf{g}(\cdot)$ 为非线性函数; \mathbf{C}_f 为适当维数的输出矩阵。

为了便于分析,对系统作如下必要假设:

- (1) 网络中的各个节点具有同样的采样周期,用 h 表示;
- (2) 各节点的数据收发采用时间驱动方式;
- (3) 数据在各节点上计算、处理所花费的时间可以忽略不计;
- (4) 网络传输过程中不存在数据包丢失现象。

基于 T-S 模糊模型,对非线性被控对象模型模糊化,可以得到

R^i : If $\omega_1(t)$ is M_1^i and \dots and $\omega_r(t)$ is M_r^i , then

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_j^i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_j^i \mathbf{v}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_j \mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $i=1, 2, \dots, N$, N 是规则数; R^i 表示第 i 条模糊规则; $\omega_j(t)$ 为前件变量; M_j^i ($j=1, 2, \dots, r$) 是定义在前件变量论域上的模糊集合; $\mathbf{A}_j^i, \mathbf{B}_j^i$ 为适当维数的常量矩阵。

当系统可能存在故障时,引入故障矩阵 $\mathbf{f}(t)$, 于是

R^i : If $\omega_1(t)$ is M_1^i and \dots and $\omega_r(t)$ is M_r^i , then

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_j^i \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_j^i \mathbf{v}(t) + \mathbf{f}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_j \mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (3)$$

考虑网络的介入,按照节点的采样周期对连续模型(3)进行离散化,得到

R^i : If $\omega_1(k)$ is M_1^i and \dots and $\omega_r(k)$ is M_r^i , then

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}^i \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}^i \mathbf{v}(k) + \mathbf{f}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C} \mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{A}^i = e^{\mathbf{A}_j^i h}$, $\mathbf{B}^i = \int_0^h e^{\mathbf{A}_j^i s} ds \mathbf{B}_j^i$, $\mathbf{C} = \mathbf{C}_j$, 假定 $(\mathbf{A}^i, \mathbf{C})$ 可观测 ($i=1, 2, \dots, N$)。

对式(4)描述的 T-S 模糊模型清晰化,可得全局模糊方程为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \sum_{i=1}^N \mu_i(\omega(k)) [\mathbf{A}^i \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}^i \mathbf{v}(k) + \mathbf{f}(k)] \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C} \mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\omega(k) = [\omega_1^T(k) \ \omega_2^T(k) \ \dots \ \omega_r^T(k)]^T$; $\mu_i(\omega(k))$ 为第 i 条规则归一化后的适用度

$$\mu_i(\omega(k)) = \frac{\mathbf{M}^i(\omega(k))}{\sum_{j=1}^N \mathbf{M}^j(\omega(k))} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{M}^i(\omega(k))$ 为 $\omega(k)$ 属于 M^i 的隶属度,即第 i 条规则的适用度。 $\mathbf{M}^i(\omega(k))$ 由直积运算求积得到

$$\mathbf{M}^i(\omega(k)) = \prod_{j=1}^r M_j^i(\omega(k)) \quad (7)$$

由上述定义显然

$$\mu_i(\omega(k)) \geq 0, \text{ 且 } \sum_{i=1}^N \mu_i(\omega(k)) = 1 \quad (8)$$

2 故障检测

对于模糊模型(4),假定从传感器输出端到控制器输入

端的网络延时为 $d_{sc}(k)$,从控制器输出端到执行器输入端的网络延时为 $d_{ca}(k)$ 。

设计观测器

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}^i \hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}^i \mathbf{v}(k) + \mathbf{L}^i [\mathbf{y}(k - d_{sc}(k)) - \hat{\mathbf{y}}(k - d_{sc}(k))] \\ \hat{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}(k) \end{cases} \quad (9)$$

令 $\mathbf{e}(k) := \mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k)$,则全局模糊系统的观测器误差方程为

$$\mathbf{e}(k+1) = \sum_{i=1}^N \mu_i(\omega(k)) [\mathbf{A}^i \mathbf{e}(k) - \mathbf{L}^i \mathbf{C} \mathbf{e}(k - d_{sc}(k)) + \mathbf{f}(k)] \quad (10)$$

在式(10)中,整个系统的观测器增益矩阵为各局部子系统的增益矩阵的加权和,这就导致稳定性分析中,对每个局部子系统,要寻找一个共同的对称正定矩阵。这往往是很困难的,到目前为止都没有一个系统的方法来寻找这样的矩阵。

为简化上述过程,引入模糊模型中的主导子系统概念^[12],定义隶属度函数最大的模糊子系统为主导子系统,即

$$\mu_M(\omega) = \max_i \{\mu_i(\omega), i = 1, 2, \dots, N\} \quad (11)$$

令主导子系统的观测器增益矩阵 \mathbf{L}^M 为整个系统的全局观测器增益矩阵,则基于模糊主导子系统的模糊观测器方程为

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}^i \hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}^i \mathbf{v}(k) + \mathbf{L}^M [\mathbf{y}(k - d_{sc}(k)) - \hat{\mathbf{y}}(k - d_{sc}(k))] \\ \hat{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}(k) \end{cases} \quad (12)$$

此时,全局模糊系统的观测器误差方程为

$$\mathbf{e}(k+1) = \sum_{i=1}^N \mu_i(\omega(k)) [\mathbf{A}^i \mathbf{e}(k) - \mathbf{L}^M \mathbf{C} \mathbf{e}(k - d_{sc}(k)) + \mathbf{f}(k)] \quad (13)$$

当系统无故障时, $\mathbf{f}(t) = 0$, 有

$$\mathbf{e}(k+1) = \sum_{i=1}^N \mu_i(\omega(k)) [\mathbf{A}^i \mathbf{e}(k) - \mathbf{L}^M \mathbf{C} \mathbf{e}(k - d_{sc}(k))] \quad (14)$$

在无线网络传输过程中,网络拓扑可能发生变化,每个周期对应的跳数具有不确定性,但系统允许的最大跳数一般是确定的(通常在路由算法中规定)。由于无线网络传输时延主要与跳数有关,因此 $d_{sc}(k)$ 也同样具有不确定性,但其上界为已知,这里用 \bar{d} 表示,即 $d_{sc}(k) \in [0, 1, \dots, \bar{d}]$ 。

定义增广向量

$$\mathbf{E}(k) = [\mathbf{e}^T(k), \mathbf{e}^T(k-1), \dots, \mathbf{e}^T(k-\bar{d})]^T \quad (15)$$

则

$$\mathbf{E}(k+1) = \sum_{i=1}^N \mu_i(\omega(k)) (\tilde{\mathbf{A}}^i - \tilde{\mathbf{L}}^M \tilde{\mathbf{C}}_{d_{sc}(k)}) \mathbf{E}(k) \quad (16)$$

式中

$$\tilde{\mathbf{A}}^i = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^i & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \mathbf{I} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{I} & 0 \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{L}}^M = \begin{bmatrix} \mathbf{L}^M \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{C}_{d_x(k)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & \overset{\text{第 } d_x(k) \text{ 列}}{\mathbf{C}} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}}_{\text{共 } \bar{d}+1 \text{ 列}}$$

\tilde{L}^M 为增广后的主导观测器增益矩阵。当时延 $d_x(k)$ 随跳数变化时,式(16)为切换系统,子系统个数为 $\bar{d}+1$ 个。

通过上述推导,将本文系统的状态估计误差方程的稳定性问题转化成离散切换系统的稳定性问题,且每个切换子系统均为模糊系统,而该模糊系统受主导控制规则约束。系统的自主切换与无线传输的跳数有关。下面根据切换系统和模糊主导控制规则的相关理论,论证该系统的稳定性。

引理 1^[13] 对于离散切换系统

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}(k) \quad (17)$$

式中, $i=1,2,\dots,r,r<\infty$ 为子系统的个数。若存在共同的对称正定矩阵 \mathbf{P} ,使所有子系统均满足

$$\mathbf{A}_i^T \mathbf{P} \mathbf{A}_i - \mathbf{P} < 0, i = 1, 2, \dots, r \quad (18)$$

则整个离散切换系统是渐进稳定的。

引理 2^[14] (Schur 补) 给定常数矩阵 $\mathbf{A}, \mathbf{P}, \mathbf{Q}$, 且 $\mathbf{Q}=\mathbf{Q}^T, \mathbf{P}=\mathbf{P}^T > 0$, 则 $\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{Q} < 0$ 成立, 当且仅当

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{A}^T \\ \mathbf{A} & -\mathbf{P}^{-1} \end{bmatrix} < 0 \text{ 或 } \begin{bmatrix} -\mathbf{P}^{-1} & \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^T & \mathbf{Q} \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

引理 3^[12] 对于离散模糊模型

$$\mathbf{x}_{k+1} = \sum_{i=1}^N \mu_i(\omega(k)) \mathbf{A}^i \mathbf{x}_k$$

若存在共同的对称正定矩阵 \mathbf{P} , 对所有模糊子系统均有

$$(\mathbf{A}^i)^T \mathbf{P} \mathbf{A}^i - \mathbf{P} < 0, i = 1, 2, \dots, N$$

则整个模糊系统是全局渐进稳定的。

定理 1 若存在共同的对称正定矩阵 \mathbf{P} 和矩阵 \mathbf{Q} , 当时延 $d_x(k) \in [0, 1, \dots, \bar{d}]$ 时, 满足下列矩阵不等式组

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P} & \left(\sum_{i=1}^N \mu_i (\mathbf{P} \mathbf{A}^i + \mathbf{Q} \tilde{C}_{d_x(k)}) \right)^T \\ \sum_{i=1}^N \mu_i (\mathbf{P} \tilde{A}^i + \mathbf{Q} \tilde{C}_{d_x(k)}) & -\mathbf{P} \end{bmatrix} < 0 \quad (20)$$

且当模糊规则 $M=1, 2, \dots, N$ 时, 矩阵 \mathbf{P} 同时满足

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \mu_i \mu_j ((\tilde{A}^i + \tilde{L}^M \tilde{C}_{d_x(k)})^T \mathbf{P} \cdot (\tilde{A}^j + \tilde{L}^M \tilde{C}_{d_x(k)}) - \mathbf{P}) < 0 \quad (21)$$

则离散切换系统(16)是渐进稳定的。

证明 首先, 对于 N 个模糊子系统 $M=1, 2, \dots, N$, 在不考虑 $d_x(k)$ 自主切换的情况下, \tilde{L}^M 应能保证模糊系统(16)是稳定的。

为表述方便, 将 $\mu_i(\omega(k))$ 记作 μ_i 。选择 Lyapunov 函数为 $V(k) = \mathbf{E}^T(k) \mathbf{P} \mathbf{E}(k)$, 则

$$\Delta V(k) = V(k+1) - V(k) =$$

$$\sum_{i=1}^N \mu_i \mathbf{E}^T(k) (\tilde{A}^i + \tilde{L}^M \tilde{C}_{d_x(k)})^T \mathbf{P} \cdot$$

$$\sum_{j=1}^N \mu_j (\tilde{A}^j + \tilde{L}^M \tilde{C}_{d_x(k)}) \mathbf{E}(k) - \mathbf{E}^T(k) \mathbf{P} \mathbf{E}(k)$$

由于 $\sum_{i=1}^N \mu_i = 1$, 于是

$$\Delta V(k) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \mu_i \mu_j \mathbf{E}^T(k) (\tilde{A}^i + \tilde{L}^M \tilde{C}_{d_x(k)})^T \cdot$$

$$\mathbf{P} (\tilde{A}^j + \tilde{L}^M \tilde{C}_{d_x(k)}) \mathbf{E}(k) - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \mu_i \mu_j \mathbf{E}^T(k) \mathbf{P} \mathbf{E}(k) =$$

$$\mathbf{E}^T(k) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \mu_i \mu_j ((\tilde{A}^i + \tilde{L}^M \tilde{C}_{d_x(k)})^T \mathbf{P} \cdot$$

$$(\tilde{A}^j + \tilde{L}^M \tilde{C}_{d_x(k)}) - \mathbf{P}) \mathbf{E}(k)$$

因此, 若对所有的 $M=1, 2, \dots, N$, 均满足不等式(21), 则 $\Delta V(k) < 0$, 模糊系统(16)全局渐进稳定。

在得到模糊系统的稳定性条件后, 考虑当网络控制系统总时延 $d_x(k) \in [0, 1, \dots, \bar{d}]$ 时系统的稳定性条件。此时, 系统为离散切换系统。

根据引理 1, 当存在对称正定矩阵 \mathbf{P} , 使不等式

$$\left(\sum_{i=1}^N \mu_i (\tilde{A}^i + \tilde{L}^M \tilde{C}_{d_x(k)}) \right)^T \mathbf{P} \cdot$$

$$\sum_{i=1}^N \mu_i (\tilde{A}^i + \tilde{L}^M \tilde{C}_{d_x(k)}) - \mathbf{P} < 0 \quad (22)$$

对所有 $d_x(k) \in [0, 1, \dots, \bar{d}]$ 均成立时, 式(16)渐进稳定。利用引理 2, 式(22)等价于

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P} & \left(\sum_{i=1}^N \mu_i (\tilde{A}^i + \tilde{L}^M \tilde{C}_{d_x(k)}) \right)^T \\ \sum_{i=1}^N \mu_i (\tilde{A}^i + \tilde{L}^M \tilde{C}_{d_x(k)}) & -\mathbf{P}^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (23)$$

注意到式(23)中同时含有 \mathbf{P} 和 \mathbf{P}^{-1} , 矩阵不等式为非线性, 因此需进行线性化处理, 才能利用线性矩阵不等式工具箱进行直接求解。在式(23)的两边分别左乘、右乘 $\text{diag}(\mathbf{I}, \mathbf{P})$, 得到

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P} & \left(\mathbf{P} \sum_{i=1}^N \mu_i \tilde{A}^i + \mathbf{P} \sum_{i=1}^N \mu_i \tilde{L}^M \tilde{C}_{d_x(k)} \right)^T \\ \mathbf{P} \sum_{i=1}^N \mu_i \tilde{A}^i + \mathbf{P} \sum_{i=1}^N \mu_i \tilde{L}^M \tilde{C}_{d_x(k)} & -\mathbf{P} \end{bmatrix} < 0 \quad (24)$$

式(24)中含有未知项 \mathbf{P} 和 \tilde{L}^M 的乘积项, 仍需做进一步的线性化处理。令变量代换 $\mathbf{Q} = \mathbf{P} \tilde{L}^M$, 可得式(20)。 证毕

3 仿真实例

考虑如下非线性网络控制系统

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} 1.2x_1 + 0.9x_2 \\ \frac{\cos(x_2)x_1}{4 - \cos(x_1)} - x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(x_2) \end{bmatrix} \mathbf{v}(k)$$

$$\mathbf{y}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k)$$

假定采样周期 $h=100$ ms, 总时延的上界 $\bar{d}=4$, 前件变量 $w(k)$ 取为 $\mathbf{x}(k)$, 选择隶属度函数为三角形函数。现要求出主导观测器增益矩阵 L^M , 使当总时延 $d_s(k) \in [0, 1, \dots, \bar{d}]$ 时, 整个切换系统是稳定的。

对非线性对象在工作点处进行模糊划分, 可以得到如下模糊规则:

R^1 : 当 $x_1(k)$ 在 0 附近且 $x_2(k)$ 在 $\pi/2$ 附近时

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} 1.2 & 0.9 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{v}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) \end{cases}$$

R^2 : 当 $x_1(k)$ 在 $\pi/2$ 附近且 $x_2(k)$ 在 0 附近时

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} 1.2 & 0.9 \\ 0.25 & -1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{v}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) \end{cases}$$

根据定理 1, 当 $d_s(k) \in [0, 1, \dots, 4], M=1, 2$ 时, 利用 MATLAB 的线性矩阵不等式工具箱, 可以求得满足定理 1 条件的观测器增益矩阵

$$L^M = \begin{bmatrix} 0.1215 & -0.5218 \\ -0.7096 & 0.2540 \end{bmatrix}$$

假定系统在 $t=6$ s 时发生故障, 故障向量 $f(t) = [0.15 \ 0.25]^T$ 。系统发生故障情况下的误差曲线如图 2 所示。若取检测阈值为 0.1, 则由图 2 可见, 误差在 6 s 后发生突变并迅速超越阈值, 说明系统发生了故障, 系统可据此发出故障报警信号。

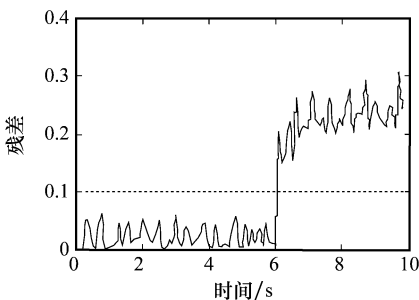


图 2 系统状态响应曲线

4 结束语

相对于有线网络控制系统, 无线网络控制系统的研究成果还很不丰富, 加之被控对象为非线性模型的情况则更加少见, 这是由于这类系统的研究具有较高的复杂性和难度。本文针对上述情况, 考虑了一类采用无线传输且被控

对象为非线性模型的网络控制系统, 对其进行故障检测研究。首先采用 T-S 模糊模型将非线性被控对象进行模糊化, 采用模糊主导规则, 设计了状态观测器, 得到了观测器误差方程, 并将观测器误差方程的稳定性问题转化成离散切换系统的稳定性问题, 其自主切换与无线传输的跳数有关, 且每个切换子系统均为模糊系统。然后利用模糊主导控制规则和切换系统理论, 推导出系统渐进稳定的矩阵不等式条件, 并给出了仿真实例。

参考文献:

- [1] Ambike Ajit, Kim Won-jong, Ji Kun. Real-time operating environment for networked control systems [C]// *Proc. of the American Control Conference*, Portland, USA, 2005:2353-2358.
- [2] Wang Changhong, Wang Yufeng, Ma Guangcheng. Compensation time-varying delays in networked control systems via jump linear system approach [C]// *Proc. of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Hangzhou, China, 2004:1343-1347.
- [3] 邱占芝, 张庆灵, 刘明. 有时延和数据包丢失的网络控制系统控制器设计 [J]. *控制与决策*, 2006, 21(6):625-630, 635.
- [4] 方华京, 方翌炜, 杨方. 网络化控制系统的故障诊断 [J]. *系统工程与电子技术*, 2006, 28(12):1858-1862. (Fang Huajing, Fang Yiwei, Yang Fang. Fault diagnosis of networked control systems [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(12):1858-1862.)
- [5] Yu Mei, Wang Long, Chu Tianguang, et al. An LMI approach to networked control systems with data packet dropout and transmission delays [C]// *Proc. of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control*, Atlantis, Paradise Island, Bahamas, 2004:14-17.
- [6] Ye Hao, Ding S X. Fault detection of networked control systems with network-induced delay [C]// *Proc. of 8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Kunming, China, 2004:294-297.
- [7] Zheng Ying, Fang Huangjing, Wang Yanwei. Kalman filter based FDI of networked control system [C]// *Proc. of 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Hangzhou, China, 2004:1330-1333.
- [8] Zhang W. *Stability analysis of networked control system* [D]. Case Western Cleveland, Ohio, USA, Reserve University, 2001.
- [9] Bao Yong, Dai Qiuqiu, Cui Yingliu, et al. Fault detection based on robust states observer on networked control systems [C]// *International Conference on Control and Automation*, Budapest, Hungary, 2005:1237-1241.
- [10] 彭丽萍, 岳东. 无线网络控制系统的研究 [J]. *控制工程*, 2006, 13(5):481-484.
- [11] 彭丽萍. 无线网络控制系统的控制器设计与仿真 [D]. 南京师范大学, 2007.
- [12] 孙增圻, 张再兴, 邓志东. *智能控制理论与技术* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [13] Zhang Mingjun, Tarn TzyhJong. A switching control strategy for nonlinear dynamic systems [C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, 2003:1476-1481.
- [14] 俞立. *鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.