



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110989552 B

(45) 授权公告日 2021.08.13

(21) 申请号 201911168250.5

审查员 赵磊

(22) 申请日 2019.11.25

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 110989552 A

(43) 申请公布日 2020.04.10

(73) 专利权人 江南大学

地址 214122 江苏省无锡市蠡湖大道1800号

(72) 发明人 姜顺 张青杭

(74) 专利代理机构 大连理工大学专利中心

21200

代理人 梅洪玉

(51) Int. Cl.

G05B 23/02 (2006.01)

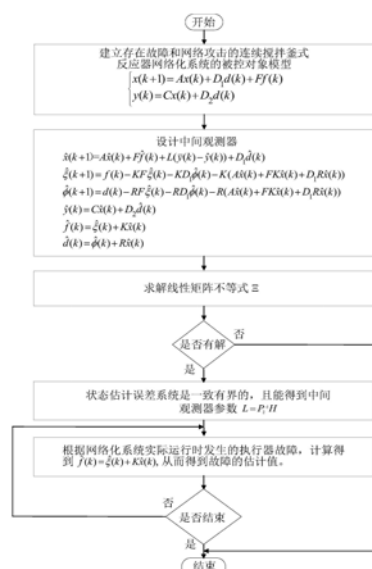
权利要求书3页 说明书9页 附图4页

(54) 发明名称

一种网络攻击下连续搅拌釜式反应器系统的故障估计方法

(57) 摘要

本发明公开一种网络攻击下连续搅拌釜式反应器系统的故障估计方法,属于网络化系统领域;首先建立存在网络攻击、扰动和故障情况下的连续搅拌釜式反应器系统模型,然后通过引入中间变量,设计中间观测器实现对状态变量和故障信号的估计;再运用Lyapunov稳定性理论和线性矩阵不等式分析方法,得到状态估计误差系统一致有界和中间观测器有解的充分条件;最后利用MatlabYALMIP工具箱求解得中间观测器参数,进而实现对状态和故障的同时估计。本发明方法考虑了实际情况下可能发生的网络攻击、外界扰动以及系统故障,能及时有效地估计故障的准确值,适用于一般的网络攻击下连续搅拌釜式反应器系统的故障估计,具有较好的普适性。



1. 一种网络攻击下连续搅拌釜式反应器系统的故障估计方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 建立存在故障和网络攻击的连续搅拌釜式反应器网络化系统的被控对象模型:

连续搅拌釜式反应器的状态空间方程如下:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + D_1 d(k) + Ff(k) \\ y(k) = Cx(k) + D_2 d(k) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 是系统的状态向量, $y(k) \in \mathbb{R}^m$ 是系统的输出向量, $d(k) \in \mathbb{R}^q$ 是系统的输入扰动, $f(k) \in \mathbb{R}^\ell$ 是待估计的故障信号, $f(k)$ 满足 $\|f(k+1) - f(k)\| \leq \theta_1$; $d(k)$ 满足 $\|d(k+1) - d(k)\| \leq \theta_2$, 同时 $f(k)$ 与 $d(k)$ 满足 $\|f(k)\| \leq \delta_1^2$, $E\{\|d(k)\|^2\} \leq \delta_2^2$; 系统参数矩阵 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $D_1 \in \mathbb{R}^{n \times q}$, $D_2 \in \mathbb{R}^{m \times q}$ 和 $F \in \mathbb{R}^{n \times \ell}$ 是已知的常数矩阵; $\theta_1, \theta_2, \delta_1, \delta_2$ 是已知的常数, $E\{\cdot\}$ 表示数学期望;

当网络通道遭受恶意攻击时,攻击者会注入虚假数据,此时位于远程网络节点的中间观测器的输入为:

$$\bar{y}(k) = Cx(k) + \beta_k(-Cx(k) + v(k)) + D_2 d(k) \quad (2)$$

其中: $v(k) \in \mathbb{R}^m$ 是恶意攻击者发送的攻击信号,满足 $\|v(k)\| \leq \delta_3$; β_k 是Bernoulli随机序列,用来表示每个采样时刻发生网络攻击的概率,当 $\beta_k = 1$ 表示通道中有网络攻击,当 $\beta_k = 0$ 表示通道中无网络攻击;根据先验知识设

$$\text{Prob}\{\beta_k = 1\} = E\{\beta_k\} = \bar{\beta} \quad (3)$$

其中, $\bar{\beta} \in (0, 1]$ 是已知常数,表示网络攻击的数学期望;

2) 设计中间观测器:

引入中间变量

$$\xi(k) = f(k) - Kx(k) \quad (4)$$

$$\phi(k) = d(k) - Rx(k) \quad (5)$$

根据式(1)、(4)和(5)则有

$$\xi(k+1) = f(k+1) - K(Ax(k) + F\xi(k) + FKx(k) + D_1 \phi(k) + D_1 Rx(k)) \quad (6)$$

$$\phi(k+1) = d(k+1) - R(Ax(k) + F\xi(k) + FKx(k) + D_1 \phi(k) + D_1 Rx(k)) \quad (7)$$

设计中间观测器如下:

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + F\hat{f}(k) + L(\bar{y}(k) - \hat{y}(k)) + D_1 \hat{d}(k) \quad (8)$$

$$\hat{\xi}(k+1) = f(k) - KF\hat{\xi}(k) - KD_1 \hat{\phi}(k) - K(A\hat{x}(k) + FK\hat{x}(k) + D_1 R\hat{x}(k)) \quad (9)$$

$$\hat{\phi}(k+1) = d(k) - RF\hat{\xi}(k) - RD_1 \hat{\phi}(k) - R(A\hat{x}(k) + FK\hat{x}(k) + D_1 R\hat{x}(k)) \quad (10)$$

$$\hat{y}(k) = C\hat{x}(k) + D_2 \hat{d}(k) \quad (11)$$

$$\hat{f}(k) = \hat{\xi}(k) + K\hat{x}(k) \quad (12)$$

$$\hat{d}(k) = \hat{\phi}(k) + R\hat{x}(k) \quad (13)$$

其中: $\xi(k)$, $\phi(k)$ 是中间状态变量, $\hat{x}(k)$, $\hat{\xi}(k)$, $\hat{\phi}(k)$, $\hat{y}(k)$, $\hat{f}(k)$, $\hat{d}(k)$ 分别为 $x(k)$, $\xi(k)$, $\phi(k)$, $y(k)$, $f(k)$, $d(k)$ 的估计值, $K = wF^T$, $R = \mu D_1^T$, w, μ 是待设计的变量; $L \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 是待设计的中间观测器参数;

定义 $e_x(k) = x(k) - \hat{x}(k)$, $e_\xi(k) = \xi(k) - \hat{\xi}(k)$, $e_\phi(k) = \phi(k) - \hat{\phi}(k)$, $e_f(k) = f(k) - \hat{f}(k)$, $e_d(k) = d(k) - \hat{d}(k)$, 状态估计误差系统如下:

$$\begin{aligned} e_x(k+1) &= x(k+1) - \hat{x}(k+1) \\ &= \tilde{\beta}_k LCx(k) + \bar{\beta} LCx(k) + (A - LC)e_x(k) + (D_1 - LD_2)e_d(k) \\ &\quad + Fe_f(k) - \tilde{\beta}_k Lv(k) - \bar{\beta} Lv(k) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} e_\xi(k+1) &= \xi(k+1) - \hat{\xi}(k+1) \\ &= f(k+1) - f(k) - K(A + FK + D_1 R)e_x(k) - KFe_\xi(k) - KD_1 e_\phi(k) \\ &= -wF^T(A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T)e_x(k) - wF^T Fe_\xi(k) - wF^T D_1 e_\phi(k) + f(k+1) - f(k) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} e_\phi(k+1) &= \phi(k+1) - \hat{\phi}(k+1) \\ &= d(k+1) - d(k) - R(A + FK + D_1 R)e_x(k) - RFe_\xi(k) - RD_1 e_\phi(k) \\ &= -\mu D_1^T(A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T)e_x(k) - \mu D_1^T Fe_\xi(k) - \mu D_1^T D_1 e_\phi(k) + d(k+1) - d(k) \end{aligned} \quad (16)$$

其中: $\tilde{\beta}_k = \beta_k - \bar{\beta}$;

3) 状态估计误差系统一致有界和中间观测器参数可解的充分条件为:

$$\Xi = \begin{bmatrix} A^T P_1 A - P_1 & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ F^T P_1 A & \Xi_1 & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ D_1^T P_1 A & D_1^T P_1 F & \Xi_2 & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \Xi_3 & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Xi_4 & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Xi_5 & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_5 I & * & * & * & * \\ \hat{\beta} HC & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\bar{\beta} H & P_2 & * & * & * \\ \bar{\beta} HC & 0 & 0 & \Xi_6 & P_2 F & P_2 D_1 - HD_2 & -\bar{\beta} H & 0 & P_2 & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \Xi_7 & -\varepsilon_1 wF^T D_1 & -\varepsilon_2 \mu D_1^T D_1 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_1 I & * \\ 0 & 0 & 0 & \Xi_8 & -\varepsilon_2 \mu D_1^T F & -\varepsilon_2 \mu D_1^T D_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

其中: $\hat{\beta} = \sqrt{\bar{\beta}(1 - \bar{\beta})}$,

$$\Xi_1 = F^T P_1 F - \varepsilon_3 I, \Xi_2 = D_1^T P_1 D_1 - \varepsilon_4 I,$$

$$\begin{aligned} \Xi_3 &= -P_2 + \frac{1}{\gamma}(-wF^T(A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T))^T(-wF^T(A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T)) \\ &\quad + \frac{1}{\gamma}(-\mu D_1^T(A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T))^T(-\mu D_1^T(A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T)), \end{aligned}$$

$$\Xi_4 = \frac{1}{\gamma}(-wF^T D_1)^T(-wF^T D_1) + \frac{1}{\gamma}(-\mu D_1^T F)^T(-\mu D_1^T F) - \varepsilon_1 I,$$

$$\Xi_5 = \frac{1}{\gamma}(-wF^T D_1)^T(-wF^T D_1) + \frac{1}{\gamma}(-\mu D_1^T D_1)^T(-\mu D_1^T D_1) - \varepsilon_2 I,$$

$$\Xi_6 = P_2 A - HC + wP_2 FF^T + \mu P_2 D_1 D_1^T - \mu H D_2 D_1^T,$$

$$\Xi_7 = -\varepsilon_1 w F^T (A + w F F^T + \mu D_1 D_1^T), H = P_2 L$$

$$\Xi_8 = -\varepsilon_2 \mu D_1^T (A + w F F^T + \mu D_1 D_1^T),$$

式(17)中*表示根据对称矩阵性质省略的对称项,0是零矩阵; $P_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $P_2 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是对称正定矩阵, $H \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 是未知的非奇异矩阵, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5$ 是未知的正标量, γ 是给定的已知标量,I是单位矩阵;

给定常数 $\bar{\beta} \in (0, 1]$ 以及 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \gamma, \mu, w$,利用MATLAB中的YALMIP工具箱求解式(17),当存在正定矩阵 P_1, P_2 和矩阵H使得式(17)成立,则状态估计误差系统是一致有界的,中间观测器参数为 $L = P_2^{-1} H$,即能够进行步骤4);当上述未知变量没有可行解,则系统不是一致有界的,且不能获得中间观测器参数,不能进行步骤4);

4) 连续搅拌釜式反应器网络化系统的故障估计

根据连续搅拌釜式反应器网络化系统实际运行时发生的执行器故障,由式(17)得到中间观测器参数L,然后由式(12)计算得到 $\hat{f}(k) = \hat{\xi}(k) + K\hat{x}(k)$,从而得到故障信号的估计值。

一种网络攻击下连续搅拌釜式反应器系统的故障估计方法

技术领域

[0001] 本发明属于网络化系统领域,涉及一种网络攻击下基于中间观测器的连续搅拌釜式反应器系统的故障估计方法。

背景技术

[0002] 近年来,随着网络通讯和自动控制技术的速发展与交叉融合,网络化系统逐渐应用于工业自动化的各个领域。网络化系统是一种空间分布式系统,其中传感器、执行器、控制器和估计器等部件之间是通过共享的通讯网络连接。尽管网络化系统具有灵活性强、安装简单且易于共享等优点,但是将共享网络引入到控制系统的同时,也会带来一些新的问题,如网络诱导延迟、数据包丢失、网路攻击等问题,这些不利因素将会使系统性能恶化并可能诱发系统的不稳定。

[0003] 连续搅拌釜式反应器是化工生产中广泛使用的反应设备,它是一种促使发酵原料、微生物及其他化学原料完全混合的反应器,目前已在医药、化纤、印染、食品以及合成材料等工业生产中普遍使用。随着化工生产过程信息化程度的日益提高,搅拌釜的反应过程已逐渐形成一个规模庞大的网络化系统,这类系统的信息安全和物理安全对于系统整体的可靠性是至关重要的。因此如何有效防范恶意的网络攻击,并快速检测与估计系统物理过程发生的故障是迫切需要解决的问题。

发明内容

[0004] 针对上述现有技术中存在的问题,本发明提供了一种基于中间观测器的连续搅拌釜式反应器系统的故障估计方法。考虑了连续搅拌釜式反应器系统遭受的外界扰动、过程故障以及数据传输网络通道中可能存在的恶意攻击情况,通过引入中间变量,设计中间观测器作为残差发生器和故障估计器,当网络通道遭受恶意攻击时,检测系统能够触发报警器产生报警信号,当反应器系统发生故障时,估计器能够及时准确地估计故障信息。

[0005] 本发明的技术方案:

[0006] 一种网络攻击下连续搅拌釜式反应器系统的故障估计方法,包括以下步骤:

[0007] 1) 建立存在故障和网络攻击的连续搅拌釜式反应器系统的被控对象模型,连续搅拌釜式反应器的状态空间方程如下:

$$[0008] \quad \begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + D_1 d(k) + Ff(k) \\ y(k) = Cx(k) + D_2 d(k) \end{cases} \quad (1)$$

[0009] 其中: $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 是系统的状态向量, $y(k) \in \mathbb{R}^m$ 是系统的输出向量, $d(k) \in \mathbb{R}^q$ 是系统的输入扰动, $f(k) \in \mathbb{R}^\ell$ 是待估计的故障信号, $f(k)$ 满足 $\|f(k+1) - f(k)\| \leq \theta_1$; $d(k)$ 满足 $\|d(k+1) - d(k)\| \leq \theta_2$, 同时 $f(k)$ 与 $d(k)$ 满足 $\|f(k)\| \leq \delta_1^2$, $E\{\|d(k)\|^2\} \leq \delta_2^2$; 系统参数矩阵 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $D_1 \in \mathbb{R}^{n \times q}$, $D_2 \in \mathbb{R}^{m \times q}$ 和 $F \in \mathbb{R}^{n \times \ell}$ 是已知的常数矩阵; $\theta_1, \theta_2, \delta_1, \delta_2$ 是已

知的常数, $E\{\cdot\}$ 是数学期望。

[0010] 考虑到数据通信网络通道可能被攻击, 当网络通道遭受恶意攻击时, 攻击者会注入虚假数据, 位于远程网络节点的中间观测器的输入为:

$$[0011] \quad \bar{y}(k) = Cx(k) + \beta_k(-Cx(k) + v(k)) + D_2 d(k) \quad (2)$$

[0012] 其中: $v(k) \in \mathbb{R}^m$ 是恶意攻击者发送的攻击信号, 满足 $\|v(k)\| \leq \delta_3$; β_k 是 Bernoulli 随机序列, 用来表示每个采样时刻发生网络攻击的概率, 当 $\beta_k = 1$ 表示通道中有网络攻击, 当 $\beta_k = 0$ 表示通道中无网络攻击; 根据先验知识设

$$[0013] \quad \text{Prob}\{\beta_k = 1\} = E\{\beta_k\} = \bar{\beta} \quad (3)$$

[0014] 其中, $\bar{\beta} \in (0, 1]$ 是已知常数, 表示网络攻击的数学期望;

[0015] 2) 设计中间观测器:

[0016] 通过引入中间变量

$$[0017] \quad \xi(k) = f(k) - Kx(k) \quad (4)$$

$$[0018] \quad \phi(k) = d(k) - Rx(k) \quad (5)$$

[0019] 根据式 (1)、(4) 和 (5) 则有

$$[0020] \quad \xi(k+1) = f(k+1) - K(Ax(k) + F\xi(k) + FKx(k) + D_1\phi(k) + D_1Rx(k)) \quad (6)$$

$$[0021] \quad \phi(k+1) = d(k+1) - R(Ax(k) + F\xi(k) + FKx(k) + D_1\phi(k) + D_1Rx(k)) \quad (7)$$

[0022] 由式 (2)、(6)、(7), 构造如下形式的中间观测器如下:

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + F\hat{f}(k) + L(\bar{y}(k) - \hat{y}(k)) + D_1\hat{d}(k)$$

$$\hat{\xi}(k+1) = f(k) - KF\hat{\xi}(k) - KD_1\hat{\phi}(k) - K(A\hat{x}(k) + FK\hat{x}(k) + D_1R\hat{x}(k))$$

$$[0023] \quad \hat{\phi}(k+1) = d(k) - RF\hat{\xi}(k) - RD_1\hat{\phi}(k) - R(A\hat{x}(k) + FK\hat{x}(k) + D_1R\hat{x}(k))$$

$$\hat{y}(k) = C\hat{x}(k) + D_2\hat{d}(k)$$

$$\hat{f}(k) = \hat{\xi}(k) + K\hat{x}(k) \quad (8)$$

$$[0024] \quad \hat{d}(k) = \hat{\phi}(k) + R\hat{x}(k)$$

[0025] 其中: $\xi(k)$, $\phi(k)$ 是中间状态变量, $\hat{x}(k)$, $\hat{\xi}(k)$, $\hat{\phi}(k)$, $\hat{y}(k)$, $\hat{f}(k)$ 和 $\hat{d}(k)$ 分别表示 $x(k)$, $\xi(k)$, $\phi(k)$, $y(k)$, $f(k)$ 和 $d(k)$ 估计值, $K = wF^T$, $R = \mu D_1^T$, w, μ 是待设计的参数, $L \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 是待设计的观测器增益。

[0026] 定义

$$e_x(k) = x(k) - \hat{x}(k), \quad e_\xi(k) = \xi(k) - \hat{\xi}(k), \quad e_\phi(k) = \phi(k) - \hat{\phi}(k), \quad e_f(k) = f(k) - \hat{f}(k),$$

$e_d(k) = d(k) - \hat{d}(k)$, 则状态估计误差系统可表示为

$$e_x(k+1) = x(k+1) - \hat{x}(k+1)$$

$$[0027] \quad \begin{aligned} &= \tilde{\beta}_k LCx(k) + \bar{\beta} LCx(k) + (A - LC)e_x(k) + (D_1 - LD_2)e_d(k) \\ &\quad + Fe_f(k) - \tilde{\beta}_k Lv(k) - \bar{\beta} Lv(k) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
e_{\xi}(k+1) &= \xi(k+1) - \hat{\xi}(k+1) \\
[0028] \quad &= f(k+1) - f(k) - K(A + FK + D_1 R)e_x(k) - KFe_{\xi}(k) - KD_1 e_{\phi}(k) \\
&= -wF^T(A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T)e_x(k) - wF^T Fe_{\xi}(k) - wF^T D_1 e_{\phi}(k) + f(k+1) - f(k)
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
e_{\phi}(k+1) &= \phi(k+1) - \hat{\phi}(k+1) \\
[0029] \quad &= d(k+1) - d(k) - R(A + FK + D_1 R)e_x(k) - RFe_{\xi}(k) - RD_1 e_{\phi}(k) \\
&= -\mu D_1^T(A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T)e_x(k) - \mu D_1^T Fe_{\xi}(k) - \mu D_1^T D_1 e_{\phi}(k) + d(k+1) - d(k)
\end{aligned} \tag{11}$$

[0030] 其中: $\tilde{\beta}_k = \beta_k - \bar{\beta}$;

[0031] 3) 状态估计误差系统一致有界及中间观测器存在的充分条件为:

$$[0032] \quad \Xi = \begin{bmatrix} A^T P_1 A - P_1 & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ F^T P_1 A & \Xi_1 & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ D_1^T P_1 A & D_1^T P_1 F & \Xi_2 & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \Xi_3 & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Xi_4 & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Xi_5 & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_5 I & * & * & * & * \\ \hat{\beta} H C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\bar{\beta} H & P_2 & * & * & * \\ \bar{\beta} H C & 0 & 0 & \Xi_6 & P_2 F & P_2 D_1 - H D_2 & -\bar{\beta} H & 0 & P_2 & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \Xi_7 & -\varepsilon_1 w F^T D_1 & -\varepsilon_2 \mu D_1^T D_1 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_1 I & * \\ 0 & 0 & 0 & \Xi_8 & -\varepsilon_2 \mu D_1^T F & -\varepsilon_2 \mu D_1^T D_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_2 I \end{bmatrix} < 0 \tag{12}$$

[0033] 其中:

$$[0034] \quad \hat{\beta} = \sqrt{\bar{\beta}(1-\bar{\beta})},$$

$$[0035] \quad \Xi_1 = F^T P_1 F - \varepsilon_3 I, \Xi_2 = D_1^T P_1 D_1 - \varepsilon_4 I,$$

$$\begin{aligned}
[0036] \quad \Xi_3 &= -P_2 + \frac{1}{\gamma}(-wF^T(A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T))^T(-wF^T(A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T)) \\
&\quad + \frac{1}{\gamma}(-\mu D_1^T(A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T))^T(-\mu D_1^T(A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T)),
\end{aligned}$$

$$[0037] \quad \Xi_4 = \frac{1}{\gamma}(-wF^T D_1)^T(-wF^T D_1) + \frac{1}{\gamma}(-\mu D_1^T F)^T(-\mu D_1^T F) - \varepsilon_1 I,$$

$$[0038] \quad \Xi_5 = \frac{1}{\gamma}(-wF^T D_1)^T(-wF^T D_1) + \frac{1}{\gamma}(-\mu D_1^T D_1)^T(-\mu D_1^T D_1) - \varepsilon_2 I,$$

$$[0039] \quad \Xi_6 = P_2 A - H C + w P_2 F F^T + \mu P_2 D_1 D_1^T - \mu H D_2 D_1^T,$$

$$[0040] \quad \Xi_7 = -\varepsilon_1 w F^T(A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T), P_2 L = H$$

$$[0041] \quad \Xi_8 = -\varepsilon_2 \mu D_1^T(A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T),$$

[0042] *代表对称位置矩阵的转置, 0是零矩阵; $P_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $P_2 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是对称正定矩阵, $H \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 是未知的非奇异矩阵, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5$ 是未知的正标量, $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \gamma, \mu, w$ 是给定的已知标量, I 是单位矩阵;

[0043] 对于给定常数 $\bar{\beta} \in (0, 1]$ 以及 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \gamma, \mu, w$, 利用MATLAB中的YALMIP工具箱求

解式(12),当存在正定矩阵 P_1, P_2 和非奇异矩阵 H 使得式(12)成立,则状态估计误差系统是一致有界的,能够获得中间观测器参数 $L=P_2^{-1}H$,即能够进行步骤4);当上述未知变量没有可行解,则估计误差不是一致有界且不能获得中间观测器参数,不能进行步骤4);

[0044] 4) 连续搅拌釜式反应器系统的故障估计

[0045] 根据连续搅拌釜式反应器网络化系统实际运行时发生的执行器故障,由式(12)求解得到中间观测器参数 L ,然后由式(8)计算得到 $\hat{f}(k)=\hat{\xi}(k)+K\hat{x}(k)$,从而得到故障的估计值。

[0046] 本发明的有益效果:本发明同时考虑了网络化系统中可能发生的网络攻击以及系统故障、传感器饱和和外界扰动情况,通过设计中间观测器实现对恶意网络攻击的有效检测和对系统故障的精确估计,所设计的中间观测器对外界扰动有较强的抑制能力,同时对网络攻击有较强的鲁棒性。

附图说明

[0047] 图1网络攻击下连续搅拌釜式反应器系统的故障估计流程图。

[0048] 图2是连续搅拌釜式反应器的示意图。

[0049] 图3是 $\bar{\beta}=0.3$ 时系统的状态估计图。其中,(a)是状态变量为 x_1 时系统的状态估计图,(b)是状态变量为 x_2 时系统的状态估计图。

[0050] 图4是 $\bar{\beta}=0.3$ 时系统的故障估计图。

[0051] 图5是 $\bar{\beta}=0.3$ 时外界扰动的估计图。

具体实施方式

[0052] 下面结合附图对本发明的具体实施方式做进一步说明。

[0053] 参照图1,一种网络攻击下基于中间观测器的连续搅拌釜式反应器系统的故障估计方法,包括以下步骤:

[0054] 步骤1:建立存在故障连续搅拌釜式反应器系统的被控对象模型:

[0055] 连续搅拌釜式反应器的状态空间方程为式(13):

$$[0056] \quad \begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + D_1d(k) + Ff(k) \\ y(k) = Cx(k) + D_2d(k) \end{cases} \quad (13)$$

[0057] 其中: $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 是系统的状态向量, $y(k) \in \mathbb{R}^m$ 是系统的输出向量, $d(k) \in \mathbb{R}^q$ 是系统的扰动输入, $f(k) \in \mathbb{R}^\ell$ 是待估计的故障信号, $f(k)$ 满足 $\|f(k+1) - f(k)\| \leq \theta_1$; $d(k)$ 满足 $\|d(k+1) - d(k)\| \leq \theta_2$,同时 $f(k)$ 与 $d(k)$ 满足 $\|f(k)\| \leq \delta_1^2$, $E\{\|d(k)\|^2\} \leq \delta_2^2$;系统参数矩阵 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $D_1 \in \mathbb{R}^{n \times q}$, $D_2 \in \mathbb{R}^{m \times q}$ 和 $F \in \mathbb{R}^{n \times \ell}$ 是已知的常数矩阵; $\theta_1, \theta_2, \delta_1, \delta_2$ 是已知的常数, $E\{\cdot\}$ 表示数学期望。

[0058] 考虑到数据通信网络通道可能被攻击,当网络通道遭受恶意攻击时,攻击者会注

入虚假数据,位于远程网络节点的中间观测器的输入为:

$$[0059] \quad \bar{y}(k) = Cx(k) + \beta_k(-Cx(k) + v(k)) + D_2 d(k) \quad (14)$$

[0060] 其中: $v(k) \in \mathbb{R}^m$ 是恶意攻击者发送的攻击信号,满足 $\|v(k)\| \leq \delta_3$; β_k 是 Bernoulli 随机序列,用来表示每个采样时刻发生网络攻击的概率,当 $\beta_k = 1$ 表示通道中有网络攻击,当 $\beta_k = 0$ 表示通道中无网络攻击;根据先验知识设

$$[0061] \quad \text{Prob}\{\beta_k = 1\} = E\{\beta_k\} = \bar{\beta} \quad (15)$$

[0062] 其中, $\bar{\beta} \in (0, 1]$ 是已知常数,表示网络攻击的数学期望;

[0063] 步骤2:设计中间观测器:

[0064] 通过引入中间变量

$$[0065] \quad \xi(k) = f(k) - Kx(k)$$

$$[0066] \quad \phi(k) = d(k) - Rx(k)$$

[0067] 根据式(13)则有

$$[0068] \quad \xi(k+1) = f(k+1) - K(Ax(k) + F\xi(k) + FKx(k) + D_1\phi(k) + D_1Rx(k)) \quad (16)$$

$$[0069] \quad \phi(k+1) = d(k+1) - R(Ax(k) + F\xi(k) + FKx(k) + D_1\phi(k) + D_1Rx(k)) \quad (17)$$

由式(14)、(16)和(17),构造如下形式的中间观测器:

$$[0070] \quad \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + F\hat{f}(k) + L(\bar{y}(k) - \hat{y}(k)) + D_1\hat{d}(k)$$

$$[0071] \quad \hat{\xi}(k+1) = f(k) - KF\hat{\xi}(k) - KD_1\hat{\phi}(k) - K(A\hat{x}(k) + FK\hat{x}(k) + D_1R\hat{x}(k))$$

$$[0072] \quad \hat{\phi}(k+1) = d(k) - RF\hat{\xi}(k) - RD_1\hat{\phi}(k) - R(A\hat{x}(k) + FK\hat{x}(k) + D_1R\hat{x}(k)) \quad \hat{y}(k) = C\hat{x}(k) + D_2\hat{d}(k)$$

$$[0073] \quad \hat{f}(k) = \hat{\xi}(k) + K\hat{x}(k) \quad (18) \quad \hat{d}(k) = \hat{\phi}(k) + R\hat{x}(k) \quad (19)$$

其中: $\xi(k)$, $\phi(k)$ 是中间状态变量, $\hat{x}(k)$, $\hat{\xi}(k)$, $\hat{\phi}(k)$, $\hat{y}(k)$, $\hat{f}(k)$ 和 $\hat{d}(k)$ 分别表示 $x(k)$, $\xi(k)$, $\phi(k)$, $y(k)$, $f(k)$ 和 $d(k)$

估计值, $K = wF^T$, $R = \mu D_1^T$, w, μ 待设计的变量, $L \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 是待设计的观测器增益。

[0074] 定义

$$e_x(k) = x(k) - \hat{x}(k), \quad e_\xi(k) = \xi(k) - \hat{\xi}(k), \quad e_\phi(k) = \phi(k) - \hat{\phi}(k), \quad e_f(k) = f(k) - \hat{f}(k),$$

$$e_d(k) = d(k) - \hat{d}(k), \text{ 状态估计误差系统如下:}$$

$$[0075] \quad \begin{aligned} e_x(k+1) &= x(k+1) - \hat{x}(k+1) \\ &= \tilde{\beta}_k LCx(k) + \bar{\beta} LCx(k) + (A - LC)e_x(k) + (D_1 - LD_2)e_d(k) \\ &\quad + Fe_f(k) - \tilde{\beta}_k Lv(k) - \bar{\beta} Lv(k) \end{aligned} \quad (20)$$

$$[0076] \quad \begin{aligned} e_\xi(k+1) &= \xi(k+1) - \hat{\xi}(k+1) \\ &= f(k+1) - f(k) - K(A + FK + D_1R)e_x(k) - KFe_\xi(k) - KD_1e_\phi(k) \\ &= -wF^T(A + wFF^T + \mu D_1D_1^T)e_x(k) - wF^TFe_\xi(k) - wF^TD_1e_\phi(k) \\ &\quad + f(k+1) - f(k) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
e_{\phi}(k+1) &= \phi(k+1) - \hat{\phi}(k+1) \\
&= d(k+1) - d(k) - R(A + FK + D_1 R)e_x(k) - RFe_{\xi}(k) - RD_1 e_{\phi}(k) \\
[0077] \quad &= -\mu D_1^T (A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T) e_x(k) - \mu D_1^T F e_{\xi}(k) - \mu D_1^T D_1 e_{\phi}(k) \\
&\quad + d(k+1) - d(k)
\end{aligned} \tag{22}$$

[0078] 其中: $\tilde{\beta}_k = \beta_k - \bar{\beta}$;

[0079] 由式(18)、(19)可得

$$[0080] \quad e_f(k) = e_{\xi}(k) + wF^T e_x(k) \tag{23}$$

$$[0081] \quad e_d(k) = e_{\phi}(k) + \mu D_1^T e_x(k) \tag{24}$$

[0082] 将式(23)和(24)代入式(20)可得

$$\begin{aligned}
[0083] \quad e_x(k+1) &= \tilde{\beta}_k LCx(k) + \bar{\beta} LCx(k) + (A - LC + wFF^T + \mu D_1 D_1^T - \mu LD_2 D_1^T) e_x(k) \\
&\quad + Fe_{\xi}(k) + (D_1 - LD_2) e_{\phi}(k) - \tilde{\beta}_k Lv(k) - \bar{\beta} Lv(k)
\end{aligned} \tag{25}$$

[0084] 步骤3: 状态估计误差系统一致有界与中间观测器存在的充分条件

[0085] 步骤3.1: 状态估计误差系统一致有界的充分条件

[0086] 构造Lyapunov函数:

$$[0087] \quad V(k) = x^T(k) P_1 x(k) + e_x^T(k) P_2 e_x(k) + \varepsilon_1 e_{\xi}^T(k) e_{\xi}(k) + \varepsilon_2 e_{\phi}^T(k) e_{\phi}(k) \tag{26}$$

$$[0088] \quad \text{对式(26)中的Lyapunov函数求差分可得 } E\{\Delta V(k)\} \leq E\{\eta^T(k) \Lambda \eta(k) + \theta^2\} \tag{27}$$

$$[0089] \quad \text{其中: } \eta(k) = [x^T(k) f^T(k) d^T(k) e_x^T(k) e_{\xi}^T(k) e_{\phi}^T(k) v(k)]^T,$$

$$[0090] \quad \Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_{11} & * & * & * & * & * & * \\ F^T P_1 A & F^T P_1 F - \varepsilon_3 I & * & * & * & * & * \\ D_1^T P_1 A & D_1^T P_1 F & D_1^T P_1 D_1 - \varepsilon_4 I & * & * & * & * \\ \Lambda_{41} & \Lambda_{42} & \Lambda_{43} & \Lambda_{44} & * & * & * \\ \Lambda_{55} & 0 & 0 & \Lambda_{54} & \Lambda_{55} & * & * \\ \Lambda_{61} & 0 & 0 & \Lambda_{64} & \Lambda_{65} & \Lambda_{66} & * \\ \Lambda_{77} & 0 & 0 & \Lambda_{74} & \Lambda_{75} & \Lambda_{76} & \Lambda_{77} \end{bmatrix} \tag{28}$$

$$[0091] \quad \theta^2 = 3\gamma\varepsilon_1^2\theta_1^2 + 3\gamma\varepsilon_2^2\theta_2^2 + \varepsilon_1\theta_1^2 + \varepsilon_2\theta_2^2 + \varepsilon_3\delta_1^2 + \varepsilon_4\delta_2^2 + \varepsilon_5\delta_3^2,$$

$$[0092] \quad \Lambda_{11} = A^T P_1 A + \hat{\beta}^2 (LC)^T P_2 (LC) + (\bar{\beta} LC)^T P_2 (\bar{\beta} LC) - P_1$$

$$[0093] \quad \Lambda_{41} = (\bar{\beta} LC)^T P_2 (A - LC + wFF^T + \mu D_1 D_1^T - \mu LD_2 D_1^T)$$

$$[0094] \quad \Lambda_{42} = (\bar{\beta} LC)^T P_2 F$$

$$[0095] \quad \Lambda_{43} = (\bar{\beta} LC)^T P_2 (D_1 - LD_2)$$

$$\begin{aligned}
\Lambda_{44} = & (-\mu D_1^T (A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T))^T \varepsilon_2 (-\mu D_1^T (A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T) + (A - \bar{\beta} LC \\
& + wFF^T + \mu D_1 D_1^T - \mu LD_2 D_1^T)^T P_2 (A - \bar{\beta} LC + wFF^T + \mu D_1 D_1^T - \mu LD_2 D_1^T) \\
& + (-wF^T (A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T))^T \varepsilon_1 (-wF^T (A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T)^T) + \frac{1}{\gamma} (-wF^T (A \\
& + wFF^T + \mu D_1 D_1^T)^T (-wF^T (A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T) + \hat{\beta}^2 (LC)^T P_2 (LC) \\
& + \frac{1}{\gamma} (-\mu D_1^T (A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T))^T (-\mu D_1^T (A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T)) - P_2
\end{aligned}$$

$$[0097] \quad \Lambda_{51} = (\bar{\beta} LC)^T P_2 F$$

$$\begin{aligned}
\Lambda_{54} = & (A - \bar{\beta} LC + wFF^T + \mu D_1 D_1^T - \mu LD_2 D_1^T)^T P F \\
& + (-wF^T (A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T))^T \varepsilon_1 (-wF^T F) \\
& + (-\mu D_1^T (A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T))^T \varepsilon_2 (-\mu D_1^T F)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Lambda_{55} = & F^T P_2 F + (-wF^T F)^T \delta_1 (-wF^T F) + (-\mu D_1^T F)^T \varepsilon_2 (-\mu D_1^T F) \\
& + \frac{1}{\gamma} (-wF^T D_1)^T (-wF^T D_1) + \frac{1}{\gamma} (-\mu D_1^T F)^T (-\mu D_1^T F) - \varepsilon_1 I
\end{aligned}$$

$$[0100] \quad \Lambda_{61} = (\bar{\beta} LC)^T P_2 (D_1 - LD_2)$$

$$\begin{aligned}
\Lambda_{64} = & (A - \bar{\beta} LC + wFF^T + \mu D_1 D_1^T - \mu LD_2 D_1^T)^T P_2 (D_1 - LD_2) \\
& + (-wF^T (A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T))^T \varepsilon_1 (-wF^T D_1) \\
& + (-\mu D_1^T (A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T))^T \varepsilon_2 (-\mu D_1^T D_1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Lambda_{65} = & (A - \bar{\beta} LC + wFF^T + \mu D_1 D_1^T - \mu LD_2 D_1^T)^T P_2 (D_1 - LD_2) \\
& + (-wF^T (A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T))^T \varepsilon_1 (-wF^T D_1) \\
& + (-\mu D_1^T (A + wFF^T + \mu D_1 D_1^T))^T \varepsilon_2 (-\mu D_1^T D_1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Lambda_{66} = & (D_1 - LD_2)^T P_2 (D_1 - LD_2) + (-wF^T D_1)^T \varepsilon_1 (-wF^T D_1) + (-\mu D_1^T D_1)^T \varepsilon_2 (-\mu D_1^T D_1) \\
& - \varepsilon_2 I + \frac{1}{\gamma} (-wF^T D_1)^T (-wF^T D_1) + \frac{1}{\gamma} (-\mu D_1^T D_1)^T (-\mu D_1^T D_1)
\end{aligned}$$

$$[0104] \quad \Lambda_{71} = \hat{\beta}^2 (LC)^T P_2 (-L) + (\bar{\beta} LC)^T P_2 (-\bar{\beta} L)$$

$$[0105] \quad \Lambda_{74} = (A - \bar{\beta} LC + wFF^T + \mu D_1 D_1^T - \mu LD_2 D_1^T)^T P_2 (-\bar{\beta} L) - \varepsilon_5 I$$

$$[0106] \quad \Lambda_{75} = F^T P_2 (-\bar{\beta} L)$$

$$[0107] \quad \Lambda_{76} = (D_1 - LD_2)^T P_2 (-\bar{\beta} L)$$

$$[0108] \quad \Lambda_{77} = (-\bar{\beta} L)^T P_2 (-\bar{\beta} L) + \hat{\beta}^2 L^T P_2 L$$

[0109] 根据Lyapunov稳定性理论,对于给定常数 $\bar{\beta} \in (0,1)$,如果存在正定矩阵 $P_1 > 0, P_2 > 0$,及矩阵 H 使得式(28)中 $\Lambda < 0$,则式(29)成立,状态误差系统是一致有界的。

$$[0110] \quad E\{\Delta V(k)\} \leq -\lambda_{\min}(-\Lambda) E\{\|e_x(k)\|^2 + \|e_\xi(k)\|^2 + \|e_\phi(k)\|^2\} + \theta^2 \quad (29)$$

[0111] 当步骤3.1得到的状态误差系统是一致有界时,再执行步骤3.2;如果步骤3.1得到的状态误差系统不是一致有界时,则状态估计误差系统(20)、(21)和(22)不是一致有界的,不能执行步骤3.2。

[0112] 步骤3.2:中间观测器存在的充分条件

[0113] 对于式(28)中如果 $\Lambda < 0$,应用Schur补引理,并令 $H = P_2 L$ 可得式(12)。利用MATLAB中的LMI工具箱进行求解,对于给定常数 $\bar{\beta} \in (0, 1]$ 以及 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \gamma, \mu, w$,求解式(12),当存在正定矩阵 P_1, P_2 和矩阵 H 使得式(12)成立,则状态估计误差一致有界,且可同时获得中间观测器参数为 $L = P_2^{-1} H$,即能够进行步骤4);当上述未知变量没有可行解,则系统不是一致有界的,且不能获得中间观测器参数,不能进行步骤4)。

[0114] 步骤4:网络化连续搅拌釜式反应器系统的故障估计

[0115] 根据步骤3.2求得的中间观测器参数,由式(18)可以得到故障的估计值,从而实现连续搅拌釜式反应器系统故障的估计。

[0116] 实施例:

[0117] 采用本发明一种网络攻击下基于中间观测器的连续搅拌釜式反应器系统的故障估计方法,在考虑网络攻击和故障的情况下,状态估计误差系统是一致有界的。具体实现方法如下:

[0118] 连续搅拌釜式反应器的动态方程如下

$$[0119] \quad V \frac{dC_A}{dt} = F(C_{Af} - C_A) - V k_0 C_A \exp\left[-\frac{E}{R_g T_r}\right]$$

$$[0120] \quad V \rho C_p \frac{dT_r}{dt} = \rho C_p F(T_f - T_r) + V(-\Delta H) k_0 C_A \times \exp\left[-\frac{E}{R_g T_r}\right] - V A_h (T_c - T_r)$$

[0121] 其中: C_A 为反应浓度, T_r 为反应温度, T_c 为冷却剂温度, V 为反应器体积, F 为过程流量, C_{Af} 为进料浓度, k_0 为反应时间常数, E/R 为反应激活能, ρ 为液体密度, C_p 为质量定压热容, T_f 为馈入温度, ΔH 为反应热, A_h 热交换系数。

[0122] 图2为连续搅拌釜式反应器的示意图,选取 $x = [C_A^T \quad T_r^T]^T$ 作为状态变量,

$u = [T_c^T \quad C_{Af}^T]^T$ 作为输入,系统参数为:

$$[0123] \quad A = \begin{bmatrix} 0.9719 & 0.0013 \\ 0.0340 & 0.8628 \end{bmatrix}, D_1 = \begin{bmatrix} 0.2 \\ -0.05 \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} 0.2 \\ -0.05 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} 0, F = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0124] 为了验证中间观测器对于故障估计的有效性,设故障信号 $f(k)$ 为:

$$[0125] \quad f(k) = \begin{cases} 0 & k < 30 \\ 0.02k - 1 & 50 \leq k < 100 \\ 5 & 100 \leq k < 200 \\ \sin(0.1j - 6) & k \geq 200 \end{cases}$$

[0126] 同时,在系统(1)中,设扰动输入如下:

$$[0127] \quad d(k) = \begin{cases} 0.2 \sin(6(k-4)) + 0.25 \sin(8(k-4)) + 6 & k > 4 \\ 0 & k \leq 4 \end{cases}$$

[0128] 设定系统的初始状态 $x(0) = [-1 \ 0]^T$, 观测器初始状态 $\hat{x}(0) = [0 \ 0]^T$, 选取 $\gamma = 1, w = 0.15, \mu = 0.05$, 和 $\bar{\beta} = 0.3, \delta_1, \delta_2, \delta_3$ 和 δ_4 分别为 50, 1, 1 和 5; 当 $k \geq 100$ 时发生网络攻击, 使用 YALMIP 工具箱求解式 (18), 可得:

$$[0129] \quad L = \begin{bmatrix} 0.0020 & -0.0101 \\ -0.0007 & 0.0067 \end{bmatrix}, \varepsilon_1 = 62.46, \varepsilon_2 = 46.86$$

[0130] 图3是 $\bar{\beta} = 0.3$ 时系统的状态及其估计图, 图4是 $\bar{\beta} = 0.3$ 时的执行器故障及其估计图, 图5是 $\bar{\beta} = 0.3$ 时输入、输出扰动及其估计图。

[0131] 总之, 从仿真结果来看, 所设计的中间观测器是有效的, 能够实时估计反应釜所发生的故障及其外界扰动信号, 可以实现网络攻击情况下连续搅拌釜式反应器系统故障的在线估计。

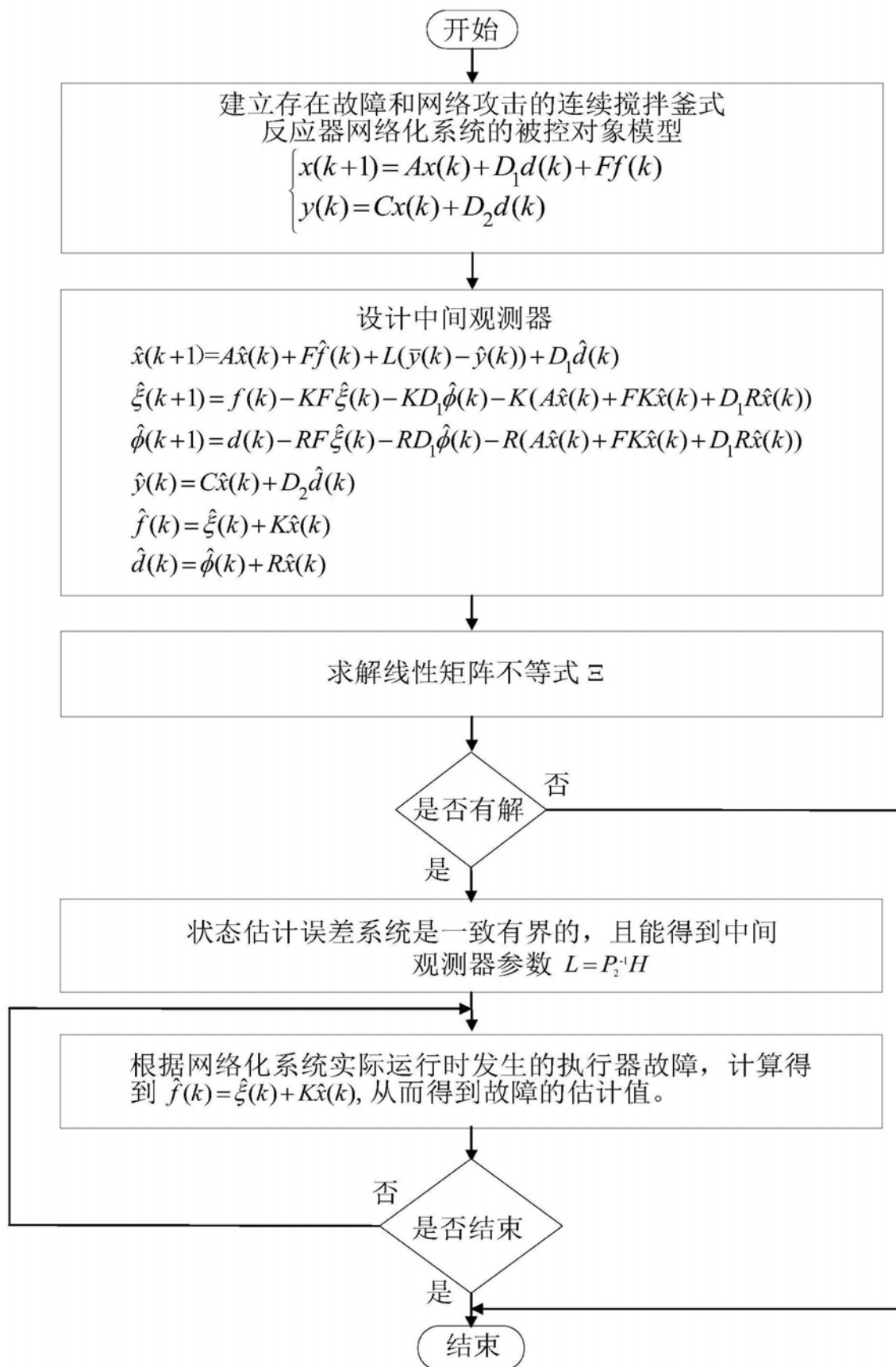


图1

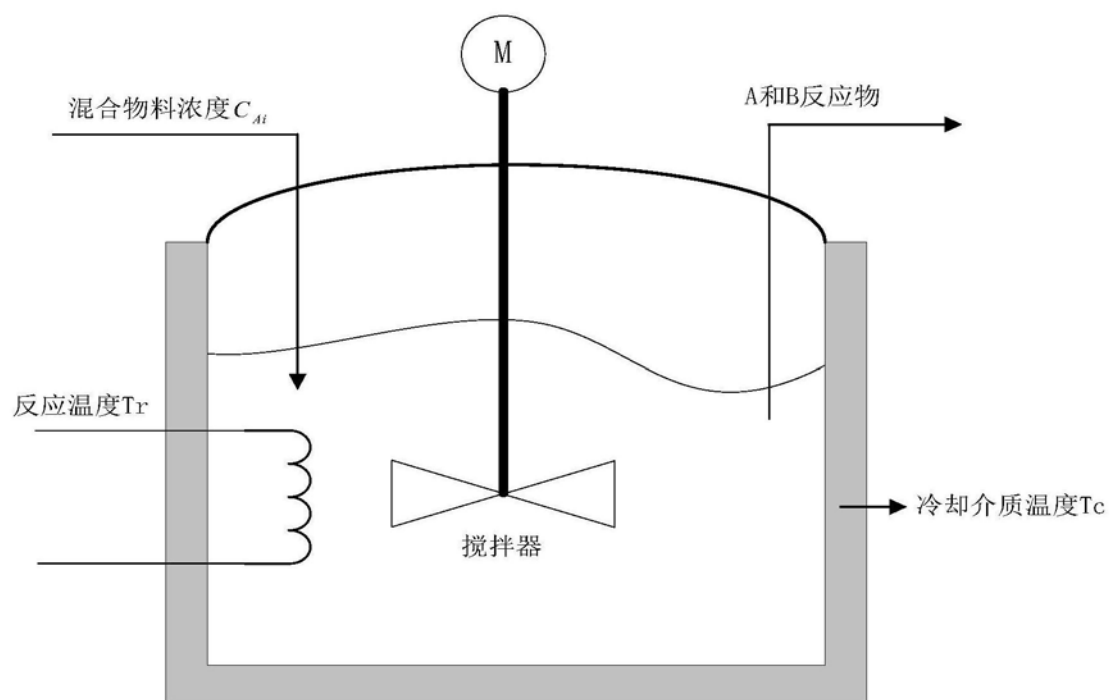
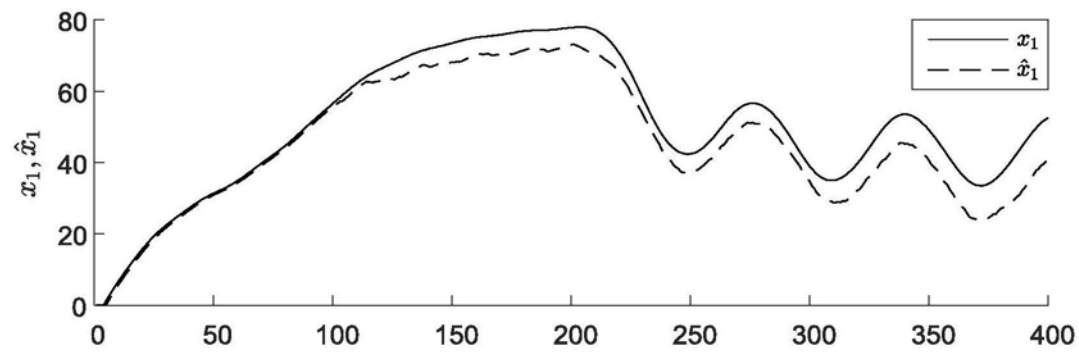
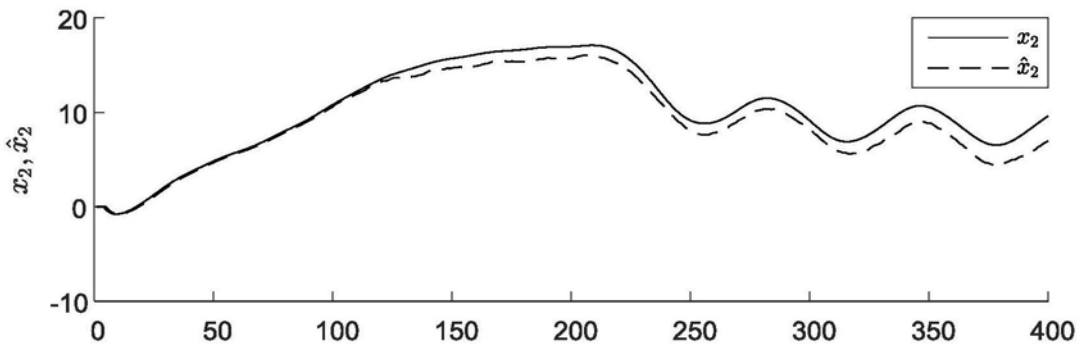


图2



(a)



(b)

图3

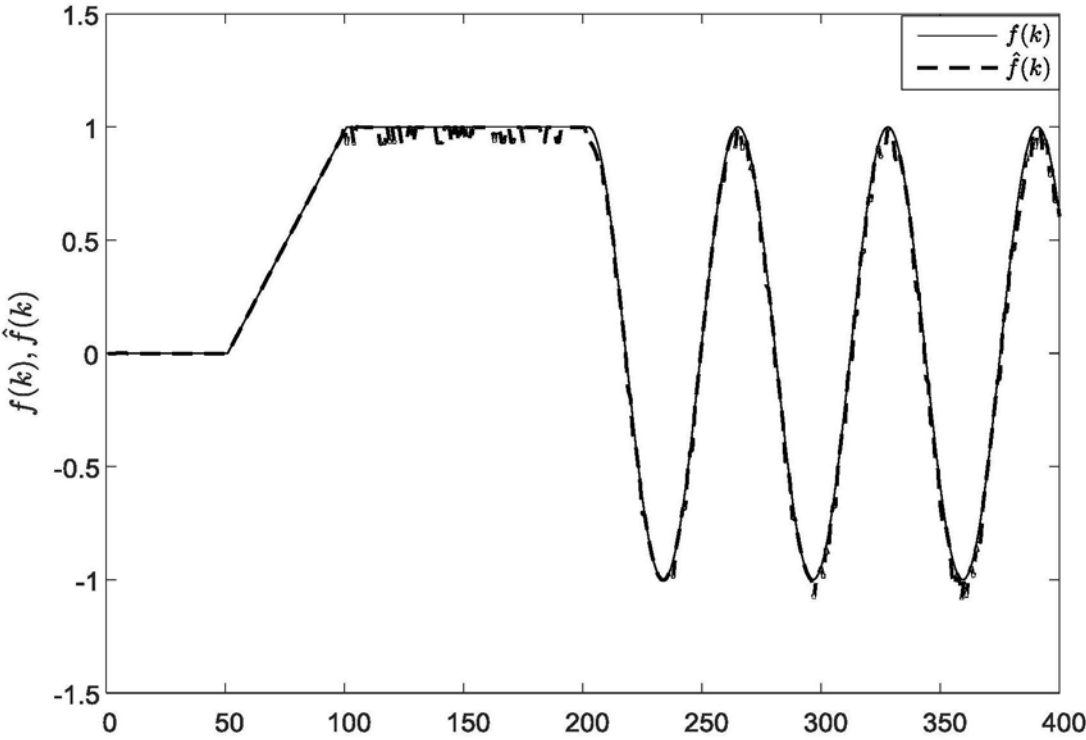


图4

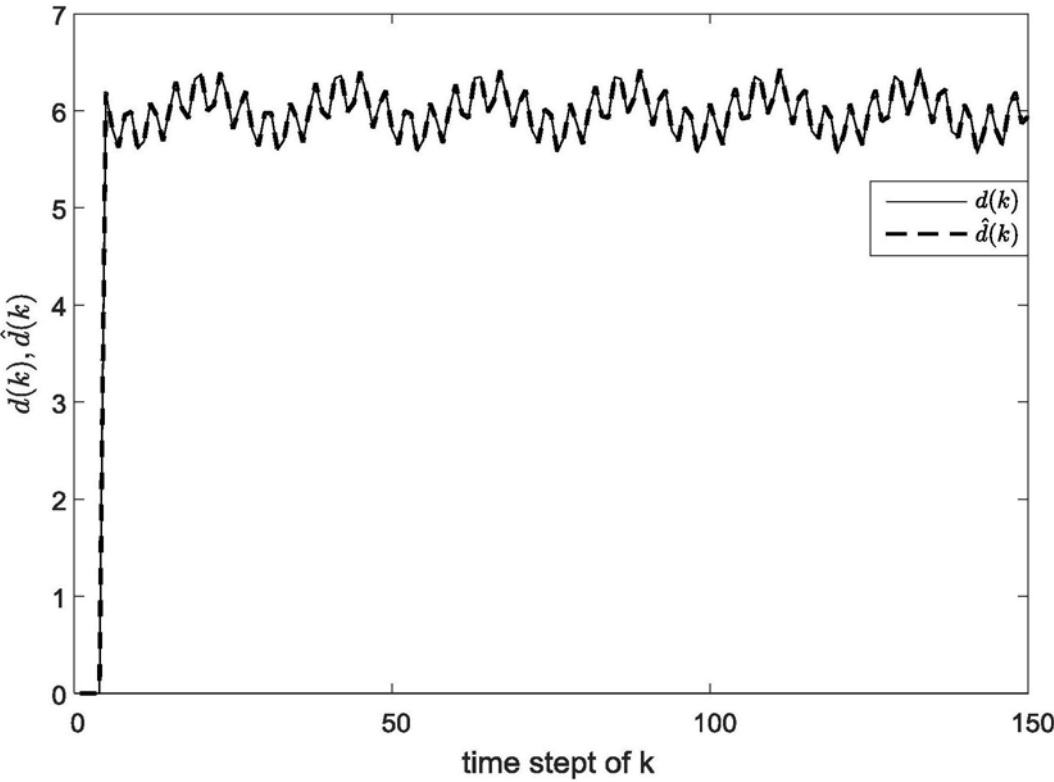


图5