

基于 Round-Robin 协议网络化系统的故障检测

汪浩, 姜顺, 潘丰

江南大学轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61403168)

通信作者: 姜顺, haveshun@jiangnan.edu.cn 收稿/录用/修回: 2019-01-23/2019-04-22/2019-06-26

摘要

针对基于 Round-Robin 通信协议网络化控制系统的鲁棒故障检测问题, 考虑传感器饱和以及外部干扰, 提出了一种通信协议约束下故障检测滤波器的设计方法. 利用李亚谱诺夫稳定性理论和线性矩阵不等式技术得到故障检测滤波器存在的充分条件, 通过求解具有凸约束的优化问题得到最优滤波器参数. 所设计的故障检测滤波器不仅能够确保滤波误差系统均方渐进稳定且具有较强的扰动抑制能力. 通过数值仿真和 DTS200 三容水箱液体渗漏检测实验验证了该方法的有效性.

关键词

网络化控制系统
Round-Robin 协议
故障检测滤波器
传感器饱和
DTS200
中图法分类号: TP273
文献标识码: A

Fault Detection for Networked Control Systems Based on Round-Robin Protocol

WANG Hao, JIANG Shun, PAN Feng

Key Laboratory of Advanced Process Control of Light Industry of the Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

Abstract

To address the problem of robust fault detection for networked control systems with Round-Robin protocol in which the sensor saturation and external disturbance are concerned, we propose an approach for designing a fault detection filter under the constraint of communication protocol. The sufficient condition for the existence of the fault detection filter is derived by applying Lyapunov stability theory and linear matrix inequality technique, and the corresponding optimal filter parameters can be obtained by solving a convex optimization problem. The designed filter not only ensures the asymptotically mean square stability of the filtering error system but possesses a much better disturbance-restraint ability. The effectiveness of the proposed method is verified by a numerical simulation and a DTS200 three-tank leakage detection test.

Keywords

networked control systems (NCS);
Round-Robin protocol;
fault detection filter;
sensor saturation;
DTS200

0 引言

近年来随着信息技术的快速发展, 网络化系统(Networked Control Systems, NCSs)的控制、滤波及故障诊断问题吸引了广大学者的持续关注^[1-3]. 由于 NCSs 中存在共享的通讯网络, 数据在网络通道传输时不可避免地会出现数据包丢失、时延、乱序等不利现象. 针对 NCSs 这类信息系统与物理过程深度融合的智能系统, 其安全性是控制系统分析与设计过程中必须考虑的重要问题. 动态系统的故障诊断技术是提高系统可靠性与安全性的重要方法, 其中故障检测是故障诊断的关键一环. 近些年来, 针对非理想网络环境下控制系统的故障检测问题已成为学术界一个研究热点^[4-6], 其中基于模型的故障诊断方法应用最为广

泛^[7-8]. 例如文[9]针对马尔可夫跳变系统的故障检测问题, 提出了一种最优故障检测滤波器设计方法, 但是该滤波器对系统故障信号的敏感度不够高; 文[10-12]主要研究了带有网络时延和数据丢包的网络化系统故障检测问题, 虽然考虑了非理想网络中存在的一些现象, 但是并没有研究数据通信协议对系统稳定性以及控制和滤波要求产生的影响; 文[13]针对带有时延和量化等问题的网络化系统故障检测问题, 通过引入事件触发机制, 有效地减轻了网络带宽负载并提高了系统的通信效率, 但是同时也减少了一些传感器数据的传输; 文[14-15]分别对线性系统和非线性系统提出了不同的故障检测方法, 但是两者只考虑了网络中存在 Bernoulli 数据丢包现象, 没有综合分析非线性扰动、传感器饱和以及通信协议对系统故障检测效果的

影响.

需要指出的是,在上述提及的多传感器网络中,多个传感器将采集到的数据打成一个数据包,利用同一网络通道进行传输.由于通讯网络存在一定的带宽约束,数据的接收和发送受到一定的限制^[16],但此时如果采用多包传输机制,又容易造成数据的冲突和时序混乱等问题,这有可能会破坏数据帧的结构,导致数据失真.因此需要设计一种特定的通信协议来管理各个传感器访问网络的权限.为了有效节约带宽,可以在某一时刻,只赋予某几个传感器访问网络的权限.目前,常用的网络调度通信协议有 SCP(Stochastic Communication Protocol)^[17]、TOD(Try Once Discard)协议^[18]和 RR(Round-Robin)协议^[19].其中 SCP 和 TOD 协议属于动态调度协议,RR 协议属于静态调度协议;相比于前两者,后者建模简单并且更容易在底层实现.目前已有许多相关研究成果,文[20]研究了基于 RR 协议和加权 TOD 协议时变系统的集员滤波问题,虽然通信协议的使用很好地避免了数据冲突问题,但是在该协议下系统的故障检测问题并没有涉及;文[21]针对一类线性时不变系统,探讨了在 RR 协议约束下系统的闭环反馈控制问题;文[22]研究了 RR 协议约束下,时变系统的分布式鲁棒估计问题.虽然基于 RR 协议控制与滤波问题有了较为深入的研究,但到目前为止,传感器饱和和约束下基于 RR 协议网络化系统的故障检测问题尚未引起关注,这激发了作者的研究兴趣.

本文在 RR 协议的基础上,考虑传感器的饱和和约束,研究非线性 NCSs 故障检测滤波器的设计问题.首先建立 RR 协议下系统的测量输出模型,利用李亚普诺夫稳定性理论和线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequality, LMI)技术分析滤波误差系统的稳定性,然后基于这一稳定性判据导出故障检测滤波器存在的充分条件,再通过求解不等式约束的最优化问题得到滤波器参数.最后利用一个数值仿真和基于网络的 DTS200 三容水箱渗漏检测实例,验证了本文所提方法的有效性和实用性.

1 问题描述

1.1 系统的建模

考虑如下形式的系统

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{A}_w\mathbf{w}(k) + \mathbf{A}_f\mathbf{f}(k) + \mathbf{g}(k, \mathbf{x}(k)) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \\ \mathbf{y}_\phi(k) = \text{sat}(\mathbf{y}(k)) + \mathbf{A}_{w1}\mathbf{w}(k) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}(k) \in \mathbb{R}^n$ 是系统的状态向量; $\mathbf{y}(k) \in \mathbb{R}^m$ 是系统的可测量输出; $\mathbf{y}_\phi(k) \in \mathbb{R}^m$ 为带有饱和约束的系统输出; $\mathbf{w}(k) \in \mathbb{R}^l$ 和 $\mathbf{f}(k) \in \mathbb{R}^l$ 分别是系统的扰动输入和待检测故障信号; $\mathbf{g}(k, \mathbf{x}(k)) \in \mathbb{R}^n$ 是系统的一个非线性函数; $\mathbf{w}(k) \in l_2[0, \infty)$, 并且 \mathbf{A} 、 \mathbf{A}_w 、 \mathbf{A}_f 、 \mathbf{A}_{w1} 和 \mathbf{C} 均为已知的具有适当维数的矩阵.

非线性向量值函数 $\mathbf{g}(k, \mathbf{x}(k))$ 满足扇形有界条件,即对于所有的 $k \in \mathbb{N}$, 使得 $\mathbf{g}(k, 0) = 0$ 成立且

$$\begin{aligned} & [\mathbf{g}(k, \mathbf{u}) - \mathbf{g}(k, \mathbf{v}) - \mathbf{R}_1(\mathbf{u} - \mathbf{v})]^T \times \\ & [\mathbf{g}(k, \mathbf{u}) - \mathbf{g}(k, \mathbf{v}) - \mathbf{R}_2(\mathbf{u} - \mathbf{v})] \leq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{R}_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $\mathbf{R}_2 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是已知实常矩阵.

饱和函数 $\text{sat}(\cdot)$ 定义为

$$\text{sat}(\mathbf{v}) = [\text{sat}_1^T(\mathbf{v}_1), \text{sat}_2^T(\mathbf{v}_2), \dots, \text{sat}_j^T(\mathbf{v}_j)]^T \quad (3)$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

其中, $\text{sat}_j(\mathbf{v}_j) = \text{sgn}(\mathbf{v}_j) \cdot \min\{\mathbf{v}_{j, \max}, |\mathbf{v}_j|\}$, $\mathbf{v}_{j, \max}$ 是饱和水平向量 \mathbf{v}_{\max} 的第 j 个元素. 这里的“sgn”表示为符号函数.

定义 1 对于一个非线性向量值函数 $\phi(\cdot)$, 给定两个实矩阵 $\mathbf{K}_1 \in \mathbb{R}^{m \times m}$, $\mathbf{K}_2 \in \mathbb{R}^{m \times m}$, 并且 $\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1$ 是一个正定对称矩阵^[24], 满足

$$[\phi(\mathbf{C}\mathbf{x}(k)) - \mathbf{K}_1\mathbf{C}\mathbf{x}(k)]^T [\phi(\mathbf{C}\mathbf{x}(k)) - \mathbf{K}_2\mathbf{C}\mathbf{x}(k)] \leq 0 \quad (4)$$

则称该非线性函数 $\phi(\cdot)$ 满足扇形有界条件, 并且 $\phi(\cdot)$ 属于区间 $[\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2]$. 因此, 该饱和函数可以分解为一个线性部分和一个非线性部分的和, 即

$$\text{sat}(\mathbf{C}\mathbf{x}(k)) = \phi(\mathbf{C}\mathbf{x}(k)) + \mathbf{K}_1\mathbf{C}\mathbf{x}(k) \quad (5)$$

其中, $\phi(\mathbf{C}\mathbf{x}(k))$ 是一个非线性向量值函数, 并且满足扇形有界条件, 即

$$\phi^T(\mathbf{C}\mathbf{x}(k)) [\phi(\mathbf{C}\mathbf{x}(k)) - \bar{\mathbf{K}}\mathbf{C}\mathbf{x}(k)] \leq 0 \quad (6)$$

由上述可知, 系统的饱和输出 $\mathbf{y}_\phi(k)$ 可以表示为

$$\mathbf{y}_\phi(k) = \phi(\mathbf{C}\mathbf{x}(k)) + \mathbf{K}_1\mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{A}_{w1}\mathbf{w}(k) \quad (7)$$

1.2 Round-Robin 通信协议的建模

为了解决多个传感器在同一采样时刻使用通信网络所造成的网络拥塞等问题, 在此引入 RR 网络通信协议. 假设在传感器网络处共有 M 个节点, 定义在 k 时刻具有权限进行通信的传感器节点为 $\sigma(k) \in \{1, 2, \dots, M\}$, $\sigma(k)$ 的值由下列算法来决定

$$\sigma(k) = \text{mod}(k-1, M) + 1 \quad (8)$$

其中函数 $\text{mod}(N, M)$ 表示 N 对 M 模运算, 其值为 N 除以 M 的余数. 由式(8)可知, 随着离散时间 k 的增加, $\sigma(k)$ 的取值始终在节点值 $\{1, 2, \dots, M\}$ 之间循环.

则传输信息的更新原则表示为

$$\bar{\mathbf{y}}_i(k) = \begin{cases} \mathbf{y}_{\phi_i}(k), & i = \sigma(k), i = 1, 2, \dots, M \\ \bar{\mathbf{y}}_i(k-1), & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\bar{\mathbf{y}}_i(k)$ 表示在 k 时刻经过网络传输的第 i 个传感器输出, 即故障检测滤波器输入的第 i 个分量. 由上可知, 故障检测滤波器的全部输入定义为

$$\bar{\mathbf{y}}(k) \triangleq [\bar{\mathbf{y}}_1(k) \quad \bar{\mathbf{y}}_2(k) \quad \dots \quad \bar{\mathbf{y}}_M(k)]^T.$$

根据式(9)所示的数据更新原则, 本文中故障检测滤波器的输入表示为

$$\bar{\mathbf{y}}(k) = \Phi_{\sigma(k)}\mathbf{y}_\phi(k) + (\mathbf{I} - \Phi_{\sigma(k)})\bar{\mathbf{y}}(k-1) \quad (10)$$

其中, $\Phi_{\sigma(k)} = \text{diag}\{\delta(\sigma(k)-1), \delta(\sigma(k)-2), \dots, \delta(\sigma(k)-M)\}$, 并且 $\delta(\cdot) \in \{0, 1\}$ 是 Kronecker Delta 函数.

令 $\bar{\mathbf{x}}(k) = [\mathbf{x}^T(k) \quad \bar{\mathbf{y}}^T(k-1)]^T$, $\boldsymbol{\omega}(k) = [\mathbf{w}^T(k) \quad \mathbf{f}^T(k)]^T$, 结合式(1)、式(7)、式(9)和式(10), 则得到

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}_1\bar{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}_1\boldsymbol{\omega}(k) + \\ \quad \mathbf{I}_1\mathbf{g}(k, \mathbf{x}(k)) + \mathbf{D}_1\phi(\mathbf{C}\mathbf{x}(k)) \\ \bar{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{C}_1\bar{\mathbf{x}}(k) + \Phi_{\sigma(k)}\phi(\mathbf{C}\mathbf{x}(k)) + \mathbf{E}_1\boldsymbol{\omega}(k) \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} A & 0 \\ \Phi_{\sigma(k)} K_1 C & I - \Phi_{\sigma(k)} \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} A_w & A_f \\ \Phi_{\sigma(k)} A_{w1} & 0 \end{bmatrix}$$

$$I_1 = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, C_1 = [\Phi_{\sigma(k)} K_1 C \quad I - \Phi_{\sigma(k)}]$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi_{\sigma(k)} \end{bmatrix}, E_1 = [\Phi_{\sigma(k)} A_{w1} \quad 0]$$

1.3 故障检测滤波器的设计

结合以上分析, 设计如下所示的全阶故障检测滤波器

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A_1 \hat{x}(k) + B_1 \bar{y}(k) \\ r(k) = C_1 \hat{x}(k) + D_1 \bar{y}(k) \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\hat{x}(k) \in R^n$ 和 $r(k) \in R^l$ 分别是滤波器的状态和残差信号, 并且 $A_1 \in R^{n \times n}$, $B_1 \in R^{n \times m}$, $C_1 \in R^{l \times n}$, $D_1 \in R^{l \times m}$ 是未知滤波器参数.

令 $\bar{x}(k) = [\bar{x}^T(k) \quad \hat{x}^T(k)]^T$, $r_e(k) = r(k) - f(k)$ 为残差误差信号, 并且结合式(11)和式(12), 可以得到如下所示的滤波误差动态系统

$$\begin{cases} \bar{x}(k+1) = A_{11} \bar{x}(k) + I_{11} g(k, x(k)) + B_{11} \omega(k) + D_{11} \phi(Cx(k)) \\ r_e(k) = r(k) - f(k) \\ \quad = C_{11} \bar{x}(k) + D_F \Phi_{\sigma(k)} \phi(Cx(k)) + (D_F E_1 - I_{12}^T) \omega(k) \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$A_{11} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ B_F C_1 & A_F \end{bmatrix}, B_{11} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_F E_1 \end{bmatrix}$$

$$I_{11} = \begin{bmatrix} I_1 \\ 0 \end{bmatrix}, E_{11} = D_F E_1 - I_{12}^T$$

$$C_{11} = [D_F C_1 \quad C_F], D_{11} = \begin{bmatrix} D_1 \\ B_F \Phi_{\sigma(k)} \end{bmatrix}$$

$$I_{12}^T = [0 \quad I]$$

通过上述滤波误差系统的设计, 基于 RR 通信协议的故障检测滤波器设计问题就可以转化为 H_∞ 滤波问题: 设计一个形如式(12)的故障检测滤波器, 使得残差信号和故障信号之间的差值尽可能的小, 并且满足下列要求:

- 1) 滤波误差系统(13)是均方渐进稳定的.
- 2) 在零初始条件下, 系统的 H_∞ 性能指标 γ 满足下列不等式

$$\sum_{k=0}^{\infty} \|r_e(k)\|^2 \leq \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \|\omega(k)\|^2 \quad (14)$$

并且要求 γ 尽可能的小.

利用系统的残差评估机制来判断系统是否发生故障, 其中包含一个评估函数 $J(k)$ 和一个阈值 J_{th} , 具体如下所示

$$\begin{cases} J(k) = E \left\{ \sum_{s=0}^k r^T(s) r(s) \right\}^{1/2} \\ J_{th} = \sup_{f(k)=0, v(k) \in l_2} J(T) \end{cases} \quad (15)$$

这里 T 是评估时间区间的长度. 通过对比 $J(k)$ 和 J_{th} 的值, 可以检测出是否有故障出现:

$$J(k) > J_{th} \Rightarrow \text{故障} \Rightarrow \text{报警}$$

$$J(k) \leq J_{th} \Rightarrow \text{无故障}$$

2 故障检测滤波器设计

引理 1^[23]: 对于矩阵 A , $Q = Q^T$ 和 $P > 0$, $A^T P A - Q < 0$ 成立当且仅当存在一个矩阵 G , 满足

$$\begin{bmatrix} -Q & A^T G \\ G^T A & P - G - G^T \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

在接下来的设计中, 将会给出滤波误差系统(13)均方渐进稳定的充分条件, 并且使得性能指标 γ 尽可能的小.

2.1 系统均方渐进稳定及 H_∞ 性能分析

定理 1 对于给定常数 M , $\lambda_1 > 0$, $\gamma > 0$ 和滤波器参数 A_1, B_1, C_1, D_1 , 如果存在正定矩阵 $P > 0$, 使得不等式(17)成立, 则称滤波误差系统(13)是均方渐进稳定的.

$$\begin{bmatrix} \Omega_{11} & * & * & * \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} & * & * \\ \Omega_{31} & \Omega_{32} & \Omega_{33} & * \\ \Omega_{41} & \Omega_{42} & \Omega_{43} & \Omega_{44} \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

其中,

$$\begin{aligned} \Omega_{11} &= A_{11}^T P A_{11} - P - \lambda_1 \Omega_1 + C_{11}^T C_{11}, \Omega_2 = -0.5((R_1 + R_2) I_{11}^T) \\ \Omega_1 &= 0.5(I_{11}(R_2^T R_1 + R_1^T R_2) I_{11}^T), \Omega_{21} = I_{11}^T P A_{11} - \lambda_1 \Omega_2 \\ \Omega_{22} &= I_{11}^T P I_{11} - \lambda_1 I, \tilde{K} = I_{11} C^T \tilde{K}^T, \Omega_{31} = B_{11}^T P A_{11} + E_{11}^T C_{11} \\ \Omega_{32} &= B_{11}^T P I_{11}, \Omega_{33} = E_{11}^T E_{11} - \gamma^2 I + B_{11}^T P B_{11} \\ \Omega_{41} &= \tilde{K}^T + D_{11}^T P A_{11} + \Phi_{\sigma(k)}^T D_F^T C_{11}, \Omega_{42} = D_{11}^T P I_{11} \\ \Omega_{43} &= D_{11}^T P B_{11} + \Phi_{\sigma(k)}^T D_F^T E_{11} \\ \Omega_{44} &= \Phi_{\sigma(k)}^T D_F^T D_F \Phi_{\sigma(k)} + D_{11}^T P D_{11} - 2I \end{aligned}$$

证明: 定义如下李亚普诺夫函数

$$V(k) = \bar{x}^T(k) P \bar{x}(k) \quad (18)$$

其中, $P > 0$.

沿着系统(13)的轨迹求偏差可知

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &= V(k+1) - V(k) \\ &= \bar{x}^T(k+1) P \bar{x}(k+1) - \bar{x}^T(k) P \bar{x}(k) \end{aligned} \quad (19)$$

这里定义

$$\eta(k) = [\bar{x}^T(k) \quad g^T(k, x(k)) \quad \omega^T(k) \quad \phi^T(Cx(k))]^T$$

将式(13)代入式(19), 并将其展开可得

$$\Delta V(k) = \eta^T(k) \cdot \begin{bmatrix} A_{11}^T P A_{11} - P & * & * & * \\ I_{11}^T P A_{11} & I_{11}^T P I_{11} & * & * \\ B_{11}^T P A_{11} & B_{11}^T P I_{11} & B_{11}^T P B_{11} & * \\ D_{11}^T P A_{11} & D_{11}^T P I_{11} & D_{11}^T P B_{11} & D_{11}^T P D_{11} \end{bmatrix} \eta(k) \quad (20)$$

考虑到式(6)中的饱和函数, 可以得到

$$-2\phi^T(Cx(k))(\phi(Cx(k)) - \bar{K}Cx(k)) \geq 0 \quad (21)$$

结合式(20)和式(21), 可以得到

$$\Delta V(k) \leq \Delta V(k) - 2\phi^T(Cx(k))(\phi(Cx(k)) - \bar{K}Cx(k)) \quad (22)$$

同时考虑到系统中的非线性函数, 并且可由式(2)推导出

$$-\lambda_1 \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ g(k, x(k)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Omega_1 & * \\ \Omega_2 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ g(k, x(k)) \end{bmatrix} \geq 0 \quad (23)$$

其中, $\lambda_1 > 0$. 结合式(20)、式(22)和式(23), 可以得到

$$\eta^T(k) \Gamma \eta(k) \leq 0 \quad (24)$$

其中

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Omega_{11} - C_{11}^T C_{11} & * & * & * \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} & * & * \\ \Omega_{31} - E_{11}^T C_{11} & \Omega_{32} & \Omega_{33} - E_{11}^T E_{11} + \gamma^2 I & * \\ \Omega_{41} - \Phi_{\sigma(k)}^T D_F^T C_{11} & \Omega_{42} & \Omega_{43} - \Phi_{\sigma(k)}^T D_F^T E_{11} & \Omega_{44} - \Phi_{\sigma(k)}^T D_F^T D_F \Phi_{\sigma(k)} \end{bmatrix}$$

下面进行性能指标的分析, 为满足式(14)中的性能指标的要求, 对式(17)运用 Schur 补引理可以得到如下表达式

$$\boldsymbol{\eta}^T(k) \Gamma \boldsymbol{\eta}(k) + \mathbf{r}_e^T(k) \mathbf{r}_e(k) - \gamma^2 \boldsymbol{\omega}^T(k) \boldsymbol{\omega}(k) < 0 \quad (25)$$

并且由式(21)和式(23)可推导出

$$V(k+1) - V(k) + \|\mathbf{r}_e(k)\|^2 - \gamma^2 \|\boldsymbol{\omega}(k)\|^2 \leq 0 \quad (26)$$

对上式两边同时取 k 从 0 到 ∞ 进行累加可得

$$V(\infty) - V(0) + \sum_{k=0}^{\infty} \|\mathbf{r}_e(k)\|^2 \leq \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \|\boldsymbol{\omega}(k)\|^2 \quad (27)$$

假设系统的初始状态为 $\boldsymbol{\eta}(0) = 0$, 并且本系统是均方渐进稳定的, 故可知 $V(\infty)$ 和 $V(0)$ 的值均为 0, 所以可以满足式(14)性能指标的要求. 至此, 定理 1 证明完毕.

由于式(17)中存在系统参数的非线性项, 在 Matlab 中无法直接求解出本文所需要的参数, 故需要进行如下处理.

2.2 故障检测滤波器存在的充分条件

定理 2 对于给定常数 M 和 $\lambda_1 > 0$, 如果存在一个矩阵 $P > 0$ 和具有适当维数的矩阵 G 、 \bar{A}_F 、 \bar{B}_F 、 \bar{C}_F 和 \bar{D}_F 满足不等式(28), 则滤波误差系统(14)是均方渐进稳定的, 并且满足预设的 H_∞ 性能指标.

$$\Xi = \begin{bmatrix} \Xi_{11} & * & * & * & * & * \\ \Xi_{21} & -\lambda_1 I & * & * & * & * \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\gamma^2 I & * & * & * \\ \Xi_{41} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -2I & * & * \\ \Xi_{51} & \mathbf{0} & E_{11} & D_F \Phi_{\sigma(k)} & -I & * \\ \Xi_{61} & \Xi_{62} & \Xi_{63} & \Xi_{64} & \mathbf{0} & \Xi_{66} \end{bmatrix} < 0 \quad (28)$$

$\sigma(k) \in \{1, 2, \dots, M\}$

其中:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & * \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix}, \Xi_{11} = \begin{bmatrix} -P_{11} - \lambda_1 \Psi_1 & * \\ -P_{12}^T - \lambda_1 \Psi_3 & -P_{22} - \lambda_1 \Psi_4 \end{bmatrix}$$

$$\Xi_{21} = [-\lambda_1 \Psi_5 \quad -\lambda_1 \Psi_6], \Xi_{41} = [\tilde{K}_1^T \quad \tilde{K}_2^T]$$

$$\Xi_{51} = [D_F C_1 \quad \bar{C}_F], \Xi_{62} = \begin{bmatrix} G_{11}^T I_1 \\ G_{12}^T I_1 \end{bmatrix}$$

$$\Xi_{61} = \begin{bmatrix} G_{11}^T A_1 + I_{63} \bar{B}_F C_1 & I_{63} \bar{A}_F \\ G_{12}^T A_1 + \bar{B}_F C_1 & \bar{A}_F \end{bmatrix}$$

$$\Xi_{63} = \begin{bmatrix} G_{11}^T B_1 + I_{63} \bar{B}_F E_1 \\ G_{12}^T B_1 + \bar{B}_F E_1 \end{bmatrix}, G_{21}^T = I_{63} G_{22}^T$$

$$\Xi_{64} = \begin{bmatrix} G_{11}^T D_1 + I_{63} \bar{B}_F \Phi_{\sigma(k)} \\ G_{12}^T D_1 + \bar{B}_F \Phi_{\sigma(k)} \end{bmatrix}, I_{63} = \begin{bmatrix} I \\ I \end{bmatrix}$$

$$\Xi_{66} = \begin{bmatrix} P_{11} - G_{11} - G_{11}^T & * \\ P_{21} - G_{22}^T G_{11} - G_{12}^T & P_{22} - G_{22} - G_{22}^T \end{bmatrix}$$

而且, 如果式(28)是可行的, 则滤波器的参数可以给出如

下形式

$$\begin{bmatrix} A_F & B_F \\ C_F & D_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{22}^{-T} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{A}_F & \bar{B}_F \\ \bar{C}_F & \bar{D}_F \end{bmatrix} \quad (29)$$

其中: $G_{22} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为非奇异矩阵.

证明: 应用 Schur 补引理和引理 1, 可将式(17)转换为

$$\begin{bmatrix} -P - \lambda_1 \Omega_1 & * & * & * & * & * \\ -\lambda_1 \Omega_2 & -\lambda_1 I & * & * & * & * \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\gamma^2 I & * & * & * \\ \tilde{K}^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -2I & * & * \\ C_{11} & \mathbf{0} & E_{11} & D_F \Phi_{\sigma(k)} & -I & * \\ G^T A_{11} & G^T I_{11} & G^T B_{11} & G^T D_{11} & \mathbf{0} & P - G - G^T \end{bmatrix} < 0 \quad (30)$$

同时令

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} \Psi_1 & \Psi_2 \\ \Psi_3 & \Psi_4 \end{bmatrix}, \Omega_2 = [\Psi_5 \quad \Psi_6]$$

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}, \tilde{K}^T = [\tilde{K}_1^T \quad \tilde{K}_2^T]$$

为了方便求解出滤波器的参数, 在此需要分块矩阵 P 为

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & * \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix}, G_{21}^T = I_{63} G_{22}^T \quad (31)$$

则滤波器参数表示如下

$$\bar{A}_F = G_{22}^T A_F, \bar{B}_F = G_{22}^T B_F, \bar{C}_F = C_F, \bar{D}_F = D_F \quad (32)$$

经过矩阵运算, 可由式(30)推导出式(28), 并且由于 G_{22} 是可逆的, 因此滤波器参数可以直接从式(32)中获得. 证明完毕.

对于系统式(13), 通过求解以下凸优化问题, 可以获得最优的故障检测滤波器参数及对应的最优 H_∞ 性能指标 γ :

$$\min: \gamma \quad (33)$$

$$\text{s. t. : 式(28), } \sigma(k) \in \{1, 2, \dots, M\}$$

3 仿真实验

本节通过两个仿真例子验证基于 RR 通讯协议网络化控制系统鲁棒故障检测方法的有效性和实用性.

3.1 数值仿真

选取如下系统参数:

$$A = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0.1 \\ 0.1 & -0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0 & -0.2 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0.8 & 0.7 \\ -0.6 & 0.9 & 0.6 \\ 0.2 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$A_w = \begin{bmatrix} 0.2 \\ -0.1 \\ 0.2 \end{bmatrix}, A_{w1} = \begin{bmatrix} 0.1 \\ -0.1 \\ 0.2 \end{bmatrix}, A_f = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ -2 \end{bmatrix}, M = 3$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} -0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & -0.3 & -0.1 \\ -0.1 & 0 & -0.3 \end{bmatrix}, R_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.1 & 0.2 \\ 0.1 & 0.3 & 0 \\ -0.1 & 0.1 & 0.3 \end{bmatrix}$$

这里取饱和函数为

$$\phi(\mathbf{y}(k)) = \frac{\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2}{2} \mathbf{y}(k) + \frac{\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_1}{2} \sin(\mathbf{x}(k))$$

其中

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 \end{bmatrix}$$

为了体现故障检测滤波器的作用, 假设故障信号 $f(k)$ 和非线性函数 $g(k, \mathbf{x}(k))$ 分别为

$$f(k) = \begin{cases} 0.6 + 0.2\sin(x) & 200 \leq k \leq 300 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$g(k, \mathbf{x}(k)) = 0.06\mathbf{x}(k) - \tanh([0.03x_1^T(k) \quad 0.02x_2^T(k) \quad 0.01x_3^T(k)]^T)$$

同时, 在系统(1)中, 给出了扰动输入, 并且在实际系统中, 扰动输入总是存在的, 所以本文给出的扰动输入如下所示

$$w(k) = e^{-0.002k} \sin(k), \quad 0 \leq k \leq 600$$

利用 Matlab 中的 LMI 工具箱, 求解式(33), 可以得出最小性能指标 $\gamma = 1.4763$, $\lambda_1 = 1.0122$. 最优滤波器参数如下所示

$$\mathbf{A}_F = \begin{bmatrix} 0.0871 & -0.0180 & 0.1185 \\ 0.0620 & -0.1682 & 0.0697 \\ 0.0506 & -0.0467 & -0.1876 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_F = \begin{bmatrix} -0.9129 & -0.0180 & -1.0337 \\ 0.0620 & -1.1682 & -0.6234 \\ 0.0506 & -0.0467 & -0.6375 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_F = [0.0404 \quad 0.0587 \quad -0.0165]$$

$$\mathbf{D}_F = [0.0404 \quad 0.0587 \quad -0.0350]$$

需要指出的是, 本例中系统有 3 个传感器节点, 因此同时对 $\sigma(k) = 1, 2, 3$ 时求解最优化问题式(33), 调用 LMI 工具箱的 mincx 函数, 便可获得 3 个节点情况下的最优一组数据.

取系统的初始状态为 $\mathbf{x}(0) = [0 \quad 0 \quad 0]^T$, $\mathbf{y}(-1) = [0 \quad 0 \quad 0]^T$, $\hat{\mathbf{x}}(k) = [0 \quad 0 \quad 0]^T$. 传感器节点在系统运行过程中的通信情况如图 1 所示, 系统的残差信号 $r(k)$ 波动如图 2 所示, 在图 3 中给出了故障发生前后残差评估函数的变化.

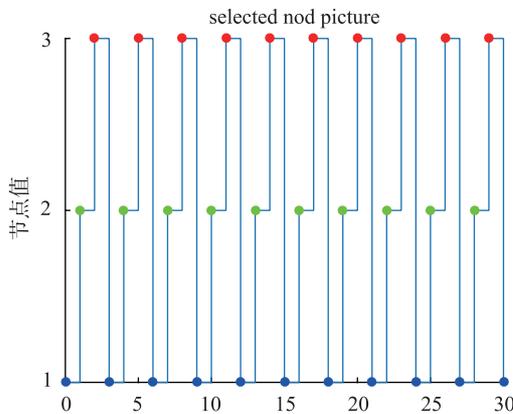


图 1 RR 协议下 3 个节点的活动情况

Fig.1 The activated situation of three sensors under the RR protocol

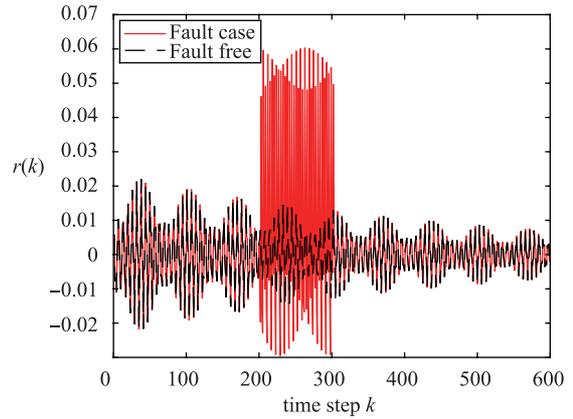


图 2 系统残差信号 $r(k)$

Fig.2 System residual signal $r(k)$

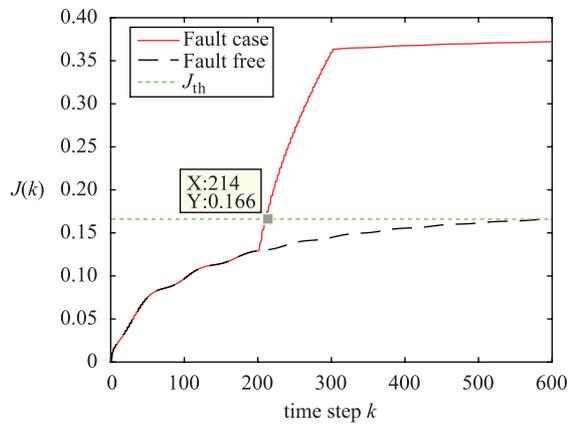


图 3 系统残差评估函数 $J(k)$

Fig.3 System residual evaluation function $J(k)$

通过图 1 可以看出, 在 RR 通信协议作用下, 每个传感器节点有相同的权限访问网络; 从图 2 可以清晰地看出在 $200 \leq k < 300$ 时, 系统发生了故障, 残差信号 $r(k)$ 有较为明显的波动; 从图 3 可以看出, 系统在 $k=200$ 发生故障后, 残差评估函数 $J(k)$ 曲线逐渐超越阈值 J_{th} . 根据(15)式中残差评价机制, 当 $k=214$ 时故障被检测出来. 从以上仿真结果来看, 本文所设计的故障检测滤波器不仅能够有效检测故障的发生, 而且对扰动有一定的抑制能力.

3.2 实例仿真

这是一个经典的三容水箱渗漏检测例子^[26-28]. 仿真选用的 DTS200 三容水箱系统是由德国 Amira 自动化公司生产的实验室设备, 它的主体部分主要由 3 个水箱、2 个水泵以及 3 个出水口组成, 其中 3 个水箱的液位为状态变量, 其具体结构如图 4 所示.

由托里切利定律可知, 该系统的非线性模型可以建立为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{h}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{S} \begin{bmatrix} Q_1 - Q_{13} \\ Q_2 + Q_{32} - Q_{20} \\ Q_{13} - Q_{32} \end{bmatrix} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C} [h_1^T \quad h_2^T \quad h_3^T]^T \end{cases} \quad (34)$$

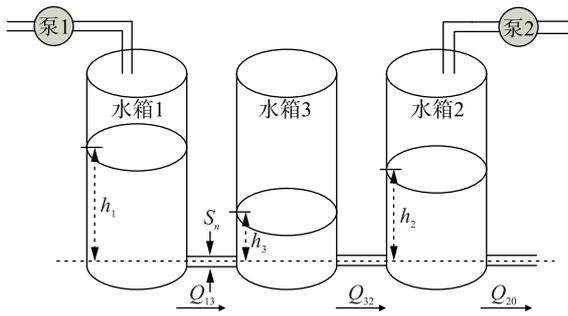


图4 DTS200 设备结构图

Fig.4 The structure of DTS200 equipment

其中: h_1, h_2, h_3 分别为 3 个水箱的液位高度, Q_1 和 Q_2 分别表示水箱 1 和水箱 2 的液体流入流量.

$$Q_{13} = az_1 S_{13} \text{sgn}(h_1 - h_3) \sqrt{2g|h_1 - h_3|}$$

$$Q_{32} = az_3 S_{32} \text{sgn}(h_3 - h_2) \sqrt{2g|h_3 - h_2|}$$

$$Q_{20} = az_2 S_{20} \sqrt{2gh_2}, S_{13} = S_{32} = S_{20} = S_n$$

Q_{ij} 表示从第 i 个水箱到第 j 个水箱的流量

$S_n = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 为水箱之间所有连接阀的横截面积, $S = 0.0154 \text{ m}^2$ 为水箱的横截面积; $az_1 = 0.450, az_2 = 0.611, az_3 = 0.462$ 分别为三个水箱的流出系数, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度.

将非线性系统(34)在某一工作点处线性化; 并利用泰勒展开式将系统(34)在平衡点处展开, 得到连续系统的状态空间模型, 取平衡点液位高度为 $h_{10} = 15 \text{ cm}, h_{20} = 7 \text{ cm}, h_{30} = 10 \text{ cm}$, 采样周期 $T = 0.1 \text{ s}$, 利用零阶保持器可将连续系统转换成离散系统. 由于 DTS200 的液位值测量简单方便, 因此考虑输出饱和约束区间上下界分别为 $\mathbf{K}_1 = \mathbf{K}_2 = \mathbf{I} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, 即可以得到如下离散系统:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{A}_w \mathbf{w}(k) + \mathbf{A}_f \mathbf{f}(k) + \mathbf{g}(k, \mathbf{x}(k)) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \\ \mathbf{y}_\varphi(k) = \text{sat}(\mathbf{y}(k)) + \mathbf{A}_{w1} \mathbf{w}(k) \end{cases}$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.9999 & 0 & 0.0001 \\ 0 & 0.9996 & 0.0002 \\ 0.0001 & 0.0002 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_w = \begin{bmatrix} 16.2190 & 0 \\ 0 & 16.2007 \\ 0.0212 & 0.0193 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{w1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_f = \begin{bmatrix} 0.0212 \\ 0.0193 \\ 16.1997 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.8 & 0 \\ 0 & 0 & -0.9 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} -0.8 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -0.9 \end{bmatrix}$$

系统的输出是 3 个水箱的液位高度, 每个水箱的液位高度数据均需要通过网络进行传输.

对于水箱 1 中的液体渗漏故障^[29], 由托里切利定律可知, 其渗漏部分液体的数学表达式为 $\theta_{A_1} \sqrt{2gh_1}$, $\theta_{A_1} =$

0.25, 即 DTS200 三容水箱系统中的故障信号可以建立为

$$f(k) = \begin{cases} 0.4289 & 30 \leq k \leq 50 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

状态扰动和非线性函数分别为

$$w(k) = 5 \begin{bmatrix} e^{-0.02k} \sin(0.2k) \\ e^{-0.01k} \cos(0.1k) \end{bmatrix}, 0 \leq k \leq 100$$

$$g(k, \mathbf{x}(k)) = 5 \sin(\mathbf{x}(k))$$

给定初始状态为

$$\mathbf{x}(0) = [15 \ 7 \ 10]^T, \mathbf{y}(-1) = [15 \ 7 \ 10]^T, \hat{\mathbf{x}} =$$

$$[10 \ 10 \ 10]^T, \text{通过求解对应的最优化问题式(33), 则可以得到最优的性能指标为 } \gamma = 3.6286, \lambda_1 = 0.7251. \text{ 此时}$$

对应的最优滤波器参数如下所示

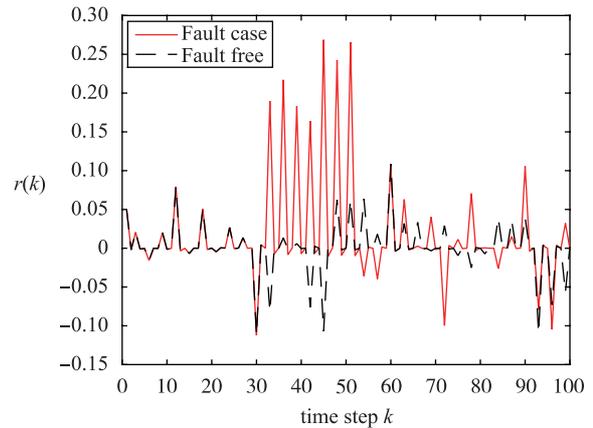
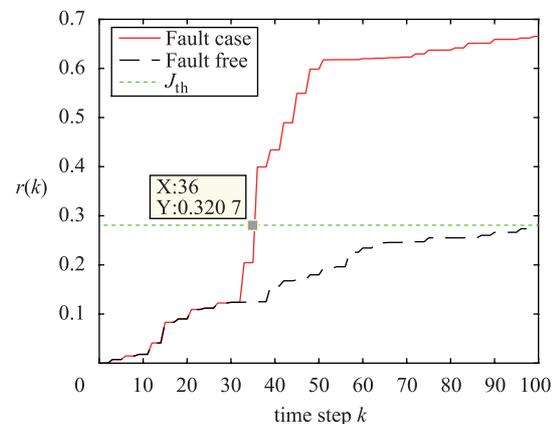
$$\mathbf{A}_F = \begin{bmatrix} -0.0499 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & -0.0511 & 0.0000 \\ 0.0000 & -0.0001 & -0.0376 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_F = \begin{bmatrix} -1.0499 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & -1.0511 & 0.0000 \\ 0.0000 & -0.0001 & -1.0376 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_F = [0.0000 \ 0.0000 \ 0.0050]$$

$$\mathbf{D}_F = [0.0000 \ 0.0000 \ 0.0048]$$

故障发生时, 残差信号的变化曲线如图 5 所示, 当

图5 DTS200 系统残差信号 $r(k)$ 图Fig.5 The system residual signal $r(k)$ of DTS200图6 DTS200 残差评估函数 $J(k)$ 图Fig.6 The system residual evaluation function $J(k)$ of DTS200

$k = 30$ 时刻系统发生故障, 残差曲线波动加剧. 图 6 表示残差评估函数 $J(k)$ 的变化, 从图中可以看出, 当渗漏故障发生后, 残差评估曲线陡然上升, 利用式 (15) 中的残差评估机制, 可以判断系统在 $k = 36$ 时刻检测出水箱 1 有渗漏, 并发出警报. 从以上实验结果来看, 本文所提出的算法能够有效检测基于 RR 协议的 DTS200 三容水箱液体渗漏故障.

4 结语

本文研究了一种基于 Round-Robin 协议离散时间非线性

网络化控制系统的鲁棒故障检测问题. 首先构建故障检测滤波器, 将故障检测问题转化成带有非线性约束的鲁棒 H_∞ 滤波问题, 然后利用李亚普诺夫稳定性理论和 LMI 技术, 得到滤波误差系统的稳定性条件, 再通过求解凸优化问题得到最优故障检测滤波器参数. 所设计的故障检测滤波器能够有效检测系统发生的故障, 而且满足 H_∞ 性能指标. 最后分别通过数值仿真和 DTS200 三容水箱实例仿真验证了本文所提方法的有效性.

在本文的基础上, 下一步将要开展基于动态调度通信协议的融合故障检测滤波的设计方法.

参考文献

- [1] 刘艳, 潘丰. 丢包网络化控制系统非脆弱量化 H_∞ 控制[J]. 信息与控制, 2016, 45(3): 320–327.
Liu Y, Pan F. Non-fragile quantized H_∞ control for Networked control system with packet dropouts[J]. Information and Control, 2016, 45(3): 320–327.
- [2] 齐晓妹. 网络控制系统的鲁棒故障检测与容错控制方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
Qi X M. Robust fault detection and fault tolerant control for networked control systems[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [3] Yan H C, Qian F F, Yang F W, et al. H_∞ filtering for nonlinear networked systems with randomly occurring distributed delays, missing measurements and sensor saturation[J]. Information Science, 2016, 370–371: 772–782.
- [4] Venkata R P, Tan Y C, Lakshminarayanan S. A mechanistic fault detection and isolation approach using kalman filter to improve the security of cyber physical systems[J]. Journal of Process Control, 2018, 68: 160–170.
- [5] 周东华, 纪洪泉, 何萧. 高速列车信息控制系统的故障诊断技术[J]. 自动化学报, 2018, 44(7): 1154–1163.
Zhou D H, Ji H Q, He X. Fault diagnosis techniques for the information control systems of high-speed trains[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(7): 1154–1163.
- [6] Thaha M, Riaz A S. An analysis of fault detection strategies in wireless sensor networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017, 78(15): 267–287.
- [7] Ding S X. Model-based fault diagnosis techniques-design schemes, algorithms and tools(2nd ed.)[M]. London, UK: Springer-Verlag, 2013.
- [8] Zhou D H, Ji H Q, He X. Fault detection and isolation of the brake cylinder system for electric multiple units[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(5): 1744–1757.
- [9] Dong H L, Wang Z D, Gao H J. Fault detection for Markovian jump systems with sensor saturations and randomly varying nonlinearities[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012, 59(10): 2354–2362.
- [10] Dong H L, Wang Z D, Gao H J. On design of quantized fault detection filters with randomly occurring nonlinearities and mixed time-delays[J]. Signal Processing, 2012, 92(4): 1117–1125.
- [11] He X, Wang Z D, Zhou D H. Robust fault detection for networked systems with communication delay and data missing[J]. Automatica, 2009, 45(11): 2634–2639.
- [12] Jiang S, Fang H J. Robust fault detection for networked control systems with nonlinear disturbances and imperfect measurements[J]. International Journal of Systems Science, 2013, 44(11): 2027–2038.
- [13] Tan Y S, Du D S, Fei S M. Co-design of event generator and quantized fault detection for time-delayed networked systems with sensor saturations[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(15): 6914–6937.
- [14] 杨蒙蒙, 钱伟. 基于神经网络预测的网络化控制系统故障检测[J]. 信息与控制, 2018, 47(1): 36–40.
Yang M M, Qian W. Fault detection of networked control systems based on neural network prediction[J]. Information and Control, 2018, 47(1): 36–40.
- [15] 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, 28(10): 1596–1600.
Luo X Y, Li N, Xu K, et al. Robust fault detection for nonlinear networked control systems with random packets loss[J]. Control and Decision, 2013, 28(10): 1596–1600.
- [16] 邹磊. 基于通信协议的网络化系统控制及滤波问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Zou L. On control and filtering of networked systems with communication protocols[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [17] Zhang J, Peng C, Fei M R, et al. Output feedback control of networked systems with a stochastic communication protocol[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(9): 3838–3853.
- [18] Zou L, Wang Z D, Han Q L, et al. Ultimate boundedness control for networked systems with try-once-discard protocol and uniform quantization effects[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(12): 6582–6588.
- [19] Zhu K Q, Song Y, Ding D R, et al. Robust MPC under event-triggered mechanism and Round-Robin protocol: An average dwell-time approach[J]. Information Sciences, 2018, 457: 126–140.

- [20] Zou L, Wang Z D, Gao H J. Set-membership filtering for time-varying systems with mixed time-delays under Round-Robin and Weighted Try-Once-Discard protocols[J]. Automatica, 2016, 74: 341 – 348.
- [21] Takahashi N, Knono M. Stabilization of linear time-invariant systems with periodic communication constraints by output sample hold control [J]. Artificial Life & Robotics, 2004, 8(2): 111 – 117.
- [22] Ugrinovskii V, Fridman E. A Round-Robin type protocol for distributed estimation with H_∞ consensus[J]. Systems & Control Letters, 2014, 69: 103 – 110.
- [23] Guo X G, Yang G H. Reliable H_∞ filter design for a class of discrete-time nonlinear systems with time-varying delay[J]. Optimal Control Applications and Methods, 2010, 31(4): 303 – 322, 2010.
- [24] Yang F W, Li Y M. Set-membership filtering for systems with sensor saturation[J]. Automatica, 2009, 45(8): 1896 – 1902.
- [25] 刘婷, 姜顺, 潘丰. 网络控制系统前向通道随机时延的在线多步预测[J]. 信息与控制, 2017, 46(5): 620 – 626.
Liu T, Jiang S, Pan F. Online multi-step prediction for the random delay of the forward channel in networked control system[J]. Information and Control, 2017, 46(5): 620 – 626.
- [26] Zhou D H, He X, Wang Z D, et al. Leakage fault diagnosis for an internet-based three-tank system: An experimental study[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(4): 857 – 870.
- [27] Li L L, Luo H, Ding S X, et al. Performance-based fault detection and fault-tolerant control for automatic control systems[J]. Automatic, 2019, 99: 308 – 316.
- [28] Ding S X. Data-driven design of fault diagnosis and fault-tolerant control systems[M]. London, UK: Springer-Verlag, 2014.
- [29] Zhang Y, Wang Z D, Zou L, et al. Fault detection filter design for networked multi-rate systems with fading measurements and randomly occurring faults[J]. IET Control Theory & Applications, 2016, 10(5): 573 – 581.

作者简介

汪 浩(1995 –), 男, 硕士生. 研究领域为网络化控制系统的故障诊断.

姜 顺(1981 –), 男, 博士, 副教授. 研究领域为网络化控制系统的故障诊断与容错控制.

潘 丰(1963 –), 男, 博士, 教授. 研究领域为生产过程建模、优化与控制.

(上接第 594 页)

- [15] 潘帅, 杨奕, 陈丹丹. 基于干扰补偿的稳定平台控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2018(1): 22 – 26.
Pan S, Yang Y, Chen D D. The design of inertial stabilization platform based on disturbance compensation[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(1): 22 – 26.
- [16] 房建成, 戚自辉, 钟麦英. 航空遥感用三轴惯性稳定平台不平衡力矩前馈补偿方法[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(1): 39 – 43.
Fang J C, Qi Z H, Zhong M Y. Feedforward compensation method for three axes inertially stabilized platform imbalance torque[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(1): 39 – 43.
- [17] Rezac M, Hurak Z. Vibration rejection for inertially stabilized double gimbal platform using acceleration feedforward[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2011: 362 – 366.
- [18] 杜运理, 夏群利, 祁载康. 导引头隔离度相位滞后对寄生回路稳定性影响研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(1): 28 – 32.
Du Y L, Xia Q L, Qi Z K. Research on effect of seeker disturbance rejection rate with phase lag on stability of parasitical loop[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(1): 28 – 32.
- [19] 汪秋婷, 戚伟, 肖铎. 基于双 Kalman 滤波的并联锂电池组循环寿命估计[J]. 信息与控制, 2018, 47(4): 461 – 467.
Wang Q T, Qi W, Xiao D. Cycle life estimation method for parallel lithium battery pack based on double Kalman filtering algorithm[J]. Information and Control, 2018, 47(4): 461 – 467.
- [20] 王泽华, 梁冬泰, 梁丹. 基于惯性/磁力传感器与单目视觉融合的 SLAM 方法[J]. 机器人, 2018, 40(6): 933 – 941.
Wang Z H, Liang D T, Liang D. A SLAM method based on inertial/magnetic sensors and monocular vision fusion[J]. Robot, 2018, 40(6): 933 – 941.

作者简介

张伟明(1982 –), 男, 博士生, 副研究员. 研究领域为稳像平台伺服控制技术.

史泽林(1965 –), 男, 博士, 研究员. 研究领域为模式识别与智能控制.

马德鹏(1982 –), 男, 硕士, 副研究员. 研究领域为稳像平台伺服结构技术.