

基于特征根优化的无线网络控制系统故障检测滤波器设计

廖 勇¹, 代学武², 周 昕¹

(1. 重庆大学飞行器测控与通信教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 西南大学电子信息工程学院, 重庆 400715)

摘 要: 为提高无线传感器执行器网络(WSANs)的可靠性, 本文提出了一种面向 WSANs 的故障检测滤波器的优化设计方法. 针对无线网络固有的较大的数据包传输延迟, 本文将该传输延迟对网络控制系统的影响建模为一种外部噪声, 创造性地提出了基于特征根分解和扰动频率估计的优化算法, 以滤除网络传输延迟导致的噪声. 该方法只需在有限个频率点对目标函数进行优化, 且避免了马尔科夫转移矩阵难以获得的难题. 最后, 通过 MATLAB/NS2 的混合仿真验证了该设计的有效性.

关键词: 无线传感器执行器网络; 网络控制系统; 网络传输延迟; 故障检测

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2015)06-1236-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.06.030

A Fault Detection Filter Design with Eigenstructure Optimization in Wireless Networked Control Systems

LIAO Yong¹, DAI Xue-wu², ZHOU Xin¹

(1. Key Laboratory of Aircraft TT&C and Communication, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to enhance the reliability of wireless sensor actuator networks (WSANs), this paper proposes an eigenstructure optimized fault detector for wireless networked control systems. Since the random packet delays caused by the wireless communication networks has adverse impacts on the control systems, the impacts of wireless network-induced delays are modeled as an external disturbance and an eigenstructure optimization method is proposed in the frequency-domain to enhance the fault detector's sensitivity to the fault and improve its robustness against the network delays. The main advantage is that the assumption of a known transition matrix of Markov jumping system is avoided. The performance of the proposed fault detector is demonstrated by the results of hybrid MATLAB/NS2 simulations.

Key words: wireless sensor actuator networks; networked control systems; network transmission delay; fault detection

1 引言

由于无线通信具有无需布线、移动性和灵活性良好等特点, 以无线传感器执行器网络(Wireless Sensor Actuator Networks, WSANs)^[1,2]为代表的无线网络控制系统被提出. 但无线网络固有的较大的随机传输延迟和较高的丢包率, 增加了无线网络控制系统中出现差错的概率, 因此 WSANs 故障检测机制的引入和对网络延迟、丢包等的处理是一个亟待解决的重要问题^[3~6].

WSANs 故障检测的本质是信号估计和滤波的问题, 即在对工业过程的输入输出信号测量的基础上构建一个新的动态系统(即故障检测器), 以生成一个包含故障信息的残差信号, 并通过一定的信号处理和滤波, 保

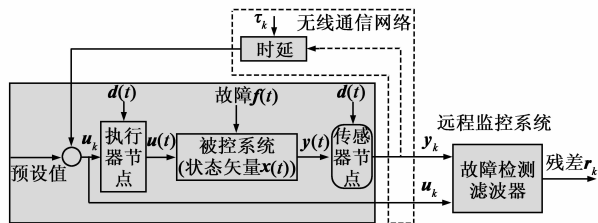
留和放大该残差信号中的故障信息, 滤除其中的噪声(如传感器测量噪声、系统建模误差和网络传输延迟等), 因此故障检测器又被称作故障滤波器^[6,7]. 由于传统的点对点数据传输和控制系统中不存在像 WSANs 中这样的随机网络传输延迟, 故传统的故障检测器设计方法不能直接使用. 目前的大多数研究中^[4~6], 普遍假定网络传输延迟是一个已知的马尔科夫过程, 从而将受控系统转化为一个马尔科夫跳变系统(Markov Jumping System, MJS), 并推导出 MJS 稳定性的充分条件, 进而采用线性矩阵不等式(Linear Matrix Inequalities, LMIs)、 H_∞ 优化等技术提高网络故障检测滤波器性能^[8]. 值得指出的是, 已有的大部分研究通常采用一个抽象的马尔科夫过程来描述网络传输延迟, 缺乏对某一特定数据传输网络

的深入分析,而且还假设网络延迟的马尔科夫转移矩阵是已知的.而对于一个实际的无线网络,马尔科夫转移矩阵是很难获取的.

本文研究了基于 IEEE 802.11b WiFi 的故障检测滤波技术,以填补这方面的研究空白.本文的创新点在于:(1)无需将网络传输延迟假设为马尔科夫过程,避免了马尔科夫转移矩阵难以获取的问题;(2)将网络延迟对故障检测滤波器的影响建模为一个外部干扰信号,提出了该干扰信号的特征频谱估计方法,并在频域上提出了一种新颖的基于特征根分解的优化算法,以提高残差信号对故障的敏感性和对网络延迟扰动的鲁棒性.

2 背景介绍

图 1 是一个 WSNs 及其故障检测滤波器的系统框图,主要由三部分构成:(1)控制系统(包括被控系统、传感器和执行器);(2)具有随机数据传输延迟的无线通信网络,用于将传感器测得的控制系统输出信号 y_k 反馈给执行器,形成闭环反馈;(3)故障检测滤波器,通过无线网络获取到 y_k 和执行器信号 u_k 进行故障检测.



天线传感器执行器网络控制系统

图1 面向无线传感执行器网络的故障检测滤波器系统框图

一个被控系统(如一个工业过程)可以用如下一个时间连续的状态空间微分方程来描述^[1,3,9]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_f f(t) + B_d v(t) \\ y(t) = Cx(t) + D_d v(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 和 $y(t) \in \mathbb{R}^p$ 分别是被控系统的状态向量、输入向量(或控制向量)和输出向量. $v(t)$ 是一个未知输入向量,称作扰动向量,用来代表传感器测量噪声、建模误差或模型不确定性.故障采用一个变量(或称作故障信号) $f(t) \in \mathbb{R}^q$ 来描述.在 WSNs 中,传感器是时间驱动的,执行器是事件驱动的.传感器以采样间隔 T 对连续输出 $f(t)$ 进行采样测量, y_k 代表 $y(t)$ 在 kT 时刻的测量值(即 $y_k = y(kT)$). y_k 通过网络发送给执行器,执行器收到 y_k 后计算和更新离散的控制信号 u_k 并通过零阶保持器转换成连续的控制输入 $u(t)$. u_k 和 y_k 均以单个数据包的形式发送,同时也发送到故障检测器.由于 WSNs 中存在从传感器发出 y_k 到执行器成功接收到 y_k 的时间延迟 τ_k ,即 $u_k = u(kT +$

τ_k).为简化讨论,一般假定 $\tau_k \leq hT$,其中 h 是一个正整数.故障 $f(t)$ 和扰动 $v(t)$ 是缓慢变化的,即在一个采样周期内是固定不变的.

故障检测器是一个从带有噪音和扰动测量值 y_k 和 u_k 中产生用于故障检测的残差信号 r_k 的信号处理(滤波)器,该滤波器可以滤除 r_k 中的噪声和扰动信号 v_k 以及由于网络延迟 τ_k 造成的影响,并保留故障信号 f_k .

3 故障检测滤波器的设计

首先将该连续动态系统离散化,将式(1)在采样周期 $[kT, (k+1)T]$ 内积分,令 $\Gamma_0(\tau_k) = \int_0^{T-\tau_k} e^{At} B dt$,

$$\Gamma_1(\tau_k) = \int_{T-\tau_k}^T e^{At} B dt, \text{ 系统(1)可以写成}^{[3,10]}: \begin{cases} x_{k+1} = \bar{A}x_k + \bar{B}u_k - \Gamma_1(\tau_k)\Delta u_k + \bar{B}_f f_k + \bar{B}_d v_k \\ y_k = Cx_k + D_d v_k \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\bar{A} = e^{AT}$, $\bar{B}_f = \int_0^T e^{At} B_f dt$, $\bar{B}_d = \int_0^T e^{At} B_d dt$, $\bar{D}_d = \int_0^T e^{At} D_d dt$ 和 $\bar{B} = \int_0^T e^{At} B dt = \Gamma_0(\tau_k) + \Gamma_1(\tau_k)$ 以及 $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$.为研究 τ_k 对控制系统的影响,将 $\Gamma_1(\tau_k)$ 展开为 $\Gamma_1(\tau_k) = A^{-1}[I - e^{A\tau_k}]e^{AT} \cdot B$,并应用泰勒近似 $e^{-A\tau_k} = [I - A\tau_k]$,可以得到:

$$\Gamma_1(\tau_k) = \bar{A}B \cdot \tau_k \quad (3)$$

定义 $\Gamma_d = [-\bar{A}B \bar{B}_d]$, $d_k = [\Delta u_k \cdot \tau_k v_k]^T$ 和 $\bar{D}_d = [0 \ D_d]$,系统模型(2)可以简写为:

$$\begin{cases} x_{k+1} = \bar{A}x_k + \bar{B}u_k + \Gamma_d d_k + \bar{B}_f f_k \\ y_k = Cx_k + \bar{D}_d d_k \end{cases} \quad (4)$$

从式(4)可以看到,网络传输延迟所带来的影响可描述为一个新的未知扰动信号 $\Delta u_k \cdot \tau_k$.对于一个如式(4)的动态系统,可得一个基于 Luenberger 观测器的故障检测滤波器^[9]:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = \bar{A}\hat{x}_k + \bar{B}u_k + L(y_k - \hat{y}_k) \\ \hat{y}_k = C\hat{x}_k \\ r_k = W(y_k - \hat{y}_k) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $r_k \in \mathbb{R}^p$ 表示该滤波器的输出信号(称作残差信号), $L \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 和 $W \in \mathbb{R}^{p \times p}$ 分别是该滤波器的增益矩阵和残差信号加权矩阵.令 $e_k = x_k - \hat{x}_k$,故障检测滤波器等式(5)的动态特性可由下式描述:

$$\begin{cases} e_{k+1} = (\bar{A} - LC)e_k + \Gamma_d d_k + \bar{B}_f f_k + L\bar{D}_d d_k \\ r_k = WCe_k + W\bar{D}_d d_k \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)可见,残差信号 r_k 不仅仅是由故障信号决定,它还受扰动信号 $d_k = [\Delta u_k \cdot \tau_k v_k]^T$ 的影响,因此残差信号也是网络延迟 τ_k 的函数.由于前后两次输入控制信号之差 Δu_k 和网络延迟 τ_k 都可能取非零值,因此

网络延迟带来的扰动信号 $\Delta \mathbf{u}_k \cdot \tau_k$ 不全为零. 这样, 即使没有故障发生 ($\mathbf{f}_k = 0$), 但由于延迟 τ_k 的存在, 残差信号 \mathbf{r}_k 仍可能不为 0, 从而导致虚警或者漏警.

本文中, 我们把滤波器的设计看成特征根赋值和优化的问题, 即为故障检测器 (6) 找到一个最优的增益矩阵 \mathbf{L} , 满足并优化以下 3 个目标: (1) 稳定性: 式 (6) 中 $\bar{\mathbf{A}} - \mathbf{LC}$ 的极点应在 z 域中的单位圆内, 从而保证该滤波器是稳定的, 即残差信号 \mathbf{r}_k 在稳态下是收敛的; (2) 对故障的敏感性: 残差 \mathbf{r}_k 应对故障 \mathbf{f}_k 敏感, 即 \mathbf{f}_k 到 \mathbf{r}_k 的增益较大; (3) 对网络延迟的鲁棒性: 残差 \mathbf{r}_k 应对 \mathbf{v}_k 和由网络延迟引起的外部扰动 $\Delta \mathbf{u}_k \cdot \tau_k$ 不敏感, 即 \mathbf{d}_k 到 \mathbf{r}_k 的增益尽可能小.

4 特征根优化

本节在传递函数矩阵的基础上, 提出了鲁棒性和灵敏性相结合的优化目标函数, 通过特征根分解和频谱分析技术完成滤波器的优化设计.

4.1 特征值分解

对式 (6) 中的信号进行 z 变换, 可以得到从 \mathbf{r}_k 到 \mathbf{f}_k 和 \mathbf{d}_k 的传递函数矩阵:

$$\begin{cases} \mathbf{G}_f(z) = \mathbf{WC}(\mathbf{zI} - \bar{\mathbf{A}} + \mathbf{LC})^{-1}\bar{\mathbf{B}}_f \\ \mathbf{G}_d(z) = \mathbf{WC}(\mathbf{zI} - \bar{\mathbf{A}} + \mathbf{LC})^{-1}(\bar{\mathbf{D}}_d - \mathbf{L}\bar{\mathbf{D}}_d)\mathbf{W}\bar{\mathbf{D}}_d \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\mathbf{G}_f(z)$ 描述了从故障信号到残差信号的传递函数关系, $\mathbf{G}_d(z)$ 描述了从扰动信号 \mathbf{d}_k 到残差信号的传递函数关系. 根据特征值分解^[11], 式 (5) 中滤波器的增益矩阵 \mathbf{L} 可以表示如下:

引理 1 若系统 (2) 是可观测的, 给定一组独立的自共轭标量 $\{\lambda_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 作为故障检测滤波器 (5) 的特征值, 且 $\{\lambda_i\}$ 与开环系统 (5) 中的极点都不重合, 则故障检测滤波器 (5) 的增益矩阵 \mathbf{L} 可以参数化表示为 $\mathbf{L} = \mathbf{E}^{-1}\mathbf{Q}$, 其中 $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 由与 $\bar{\mathbf{A}} - \mathbf{LC}$ 的特征值 λ_i 相关的左特征行 η_i 组成, $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 由自由参数矢量 \mathbf{q}_i 组成, $\mathbf{Q}^T = [\mathbf{q}_1^T \mathbf{q}_2^T \dots \mathbf{q}_n^T]^T$ ^[12].

定理 1 给定一个滤波器 (5) 和它的参数化的增益矩阵 (引理 1), 则离散传递函数矩阵 (7) 可用闭环特征值 $\{\lambda_i\}$ 和自由参数 $\{\mathbf{q}_i\}$ 来表示:

$$\begin{cases} \mathbf{G}_f(z) = \mathbf{WC}(\mathbf{E}^{-1}\boldsymbol{\Psi}(z)\mathbf{E})^{-1}\bar{\mathbf{B}}_f \\ \mathbf{G}_d(z) = \mathbf{W}\bar{\mathbf{D}}_d + \mathbf{WC}(\mathbf{E}^{-1}\boldsymbol{\Psi}(z)\mathbf{E})(\bar{\mathbf{D}}_d - \mathbf{EQD}_d) \end{cases} \quad (8)$$

其中, 特征矩阵 $\boldsymbol{\Psi}(z)$ 的构成参见文献 [12]. 该定理的证明详见文献 [12] 中引理 2, 我们将其中的传递函数矩阵替换为式 (5) 和 (7), 并作相应修正.

4.2 频域优化

干扰信号和故障信号的频率通常是不同的^[10]. 我们的思路是针对干扰信号所在的特定频段, 在该频段上对滤波器进行优化, 而不是在整个频段上优化. 这样

既可减弱网络延迟影响, 又可避免在所有频率点上对目标函数进行计算. 本文提出的滤波器优化目标函数如下:

$$\min_{\mathbf{Q}, \Lambda} J = \frac{J_1}{J_2} = \frac{\sum_{\omega_r \in \Omega_r} \beta_{\omega_r} \|\mathbf{G}_d(z)\|_{z=e^{j\omega_r}}}{\|\mathbf{G}_f(z)\|_{z=1}} \quad (9)$$

该目标函数是以一组特征根 $\Lambda = \{\lambda_i\}$ 和矩阵 \mathbf{Q} 为参数的最小化目标函数.

目标函数 J 的分子 J_1 是一个鲁棒性指标, $\omega_r \in \Omega_r$ 是无故障情况下残差信号 \mathbf{r}_k 的频谱, 加权系数 β_{ω_r} 的取值为残差频谱在 ω_r 处的幅值. 尽管扰动信号未知, 但可以合理地认为它是频带受限的. 扰动信号的频率可以通过以下定理从残差信号 \mathbf{r}_k 估计得到:

定理 2 给定扰动 \mathbf{d}_k 是带限信号, 在稳定的状态下, 故障检测滤波器 (5) 的残差 \mathbf{r}_k 的频谱 Ω_d 的子集, 即 $\Omega_r \subseteq \Omega_d$.

证明 信号频谱在线性时不变系统中通常是不变的. 通过类似的推理, 可以证明频谱不变性对多输入多输出系统也适用. 定理 2 可以被理解为 \mathbf{d}_k 的扰动频率 ω_d 不随滤波器的参数变化而改变, 它可以由残差 \mathbf{r}_k 的频谱估算而得.

在故障检测中, 并不需要得到 \mathbf{d}_k 的全频谱. 对于一些特定频率 ω_0 处的扰动, 如果 $\mathbf{G}_d(z)_{z=e^{j\omega_0}} = 0$ 或者很小, 这样无论扰动信号自身在 ω_0 处幅度值有多大, 该扰动都不会被传递到残差中, 这意味着残差 \mathbf{r}_k 不受扰动 $\mathbf{d}_0(k)$ 的影响. 因此, 不需对这样一个不对残差有影响的扰动进行优化设计, 故障检测滤波器的鲁棒性指标只需在 \mathbf{r}_k 的频率成分非零处进行优化即可.

目标函数 J 的分母 J_2 是一个灵敏性目标函数. 由于故障信号主要由低频分量组成 (如传感器卡死故障是一个常量, 传感器漂移是一个缓慢渐变的过程). 因此, 故障信号的传输矩阵只需在低频部分 (即 $z = 1$) 进行优化即可.

为增强残差对扰动的鲁棒性, 需要在扰动频率 $\{\omega_r\}$ 处最小化传递函数矩阵 $\sum \beta_{\omega_r} \|\mathbf{G}_d(z)\|$; 为增加故障信号的灵敏性, $\|\mathbf{G}_f(z)\|_{z=1}$ 指标应该最大化, 以彰显残差中的故障信号.

5 数值分析与仿真

为了验证本文提出的滤波器优化设计, 我们在 NS2 仿真平台上搭建了一个 IEEE 802.11b WiFi 网络 (包含 6 个传感器节点, 3 个执行器节点和一个位于中心的接入节点), 传输速率是 2Mbps, 数据包 \mathbf{y}_k 和 \mathbf{u}_k 都是长度为 112byte 的 IP 包, 通过仿真得到了贴近实际的网络延迟. 包延迟的仿真结果如图 2 所示, 它是一个均值为 0.0107s, 抖动为 0.0003s 的随机过程.

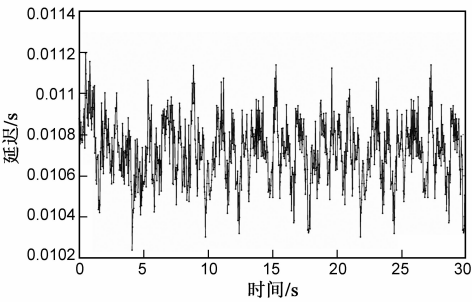


图2 传感器到控制点的包延迟 τ_k

对于被控系统,在采样间隔为 0.03s(33Hz)的条件下,离散化后的系统(1)的矩阵参数为:

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \begin{bmatrix} 1.00 & 0.03 \\ 0 & 0.9985 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} 0.0002 \\ 0.0150 \end{bmatrix}, \\ \bar{B}_f &= \bar{B}, \bar{B}_d = \begin{bmatrix} 0.0002 & 0 & 0 \\ 0.0150 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \Gamma_d &= \begin{bmatrix} -0.0150 & 0.0002 & 0 & 0 \\ -0.4993 & 0.0150 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \bar{D}_d &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

控制输入是占空比为 50%、频率为 0.4Hz 的脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)控制信号,干扰向量 $v(t)$ 包含 3 种噪声:一种是执行器产生的输入干扰,另外两种是输出测量噪声.

为了得到干扰的频率范围,对残差进行了 512 点的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT).从图 3 中可以看出,主频点在 $\omega = 0.0736\text{rad}$ 处(抽样频率为 33Hz),其对应的模拟频率为 0.8Hz,是 PWM 输入频率的 2 倍.网络传输延迟对残差的影响可以通过式(4)中的扰动信号 $d_k = [\Delta u_k \cdot \tau_k \ v_k]^T$ 来解释.网络延迟引起的加性干扰可近似建模为 Δu_k 与 τ_k 的乘积.因为控制输入在每个 PWM 周期内更新变化两次,此时的 Δu_k 较大,与传输延迟 τ_k 相乘后形成对残差较大的干扰,故残差中的扰动频率为 PWM 的两倍,即 0.8Hz.

我们设定 $\omega_r = 0.0736\text{rad}$,其权重为 $\beta_{\omega_r} = 3.5 \times 10^{-3}$,优化目标函数(9)后所得滤波器的增益矩阵为 $L = \begin{bmatrix} 0.0500 & 0.0300 \\ 0 & 0.0485 \end{bmatrix}$.该滤波器对于两种典型的故障

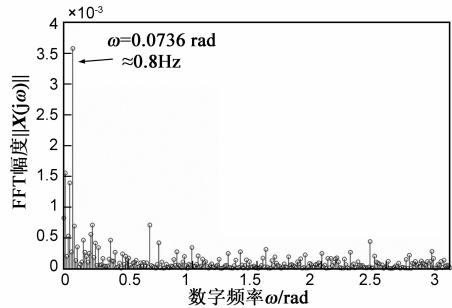
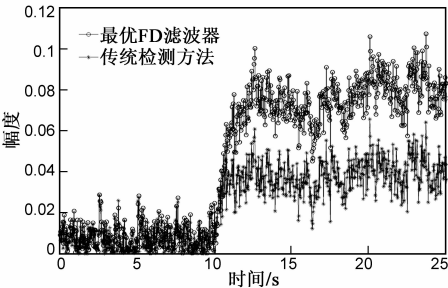
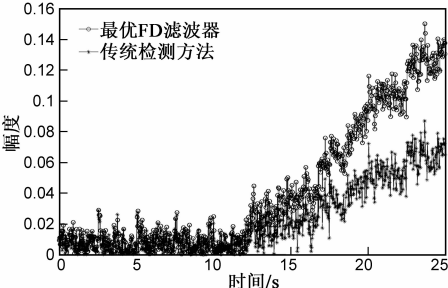


图3 无故障条件下标准观察得到的残差频谱

(突发卡死故障和渐变漂移故障)的检测效果如图 4(a)和图 4(b)所示.突发故障是一个在 10s 时的阶跃信号 $f_1(t) = 0.2(t > 10s)$,漂移故障是一个在 10s 时发生的斜坡信号 $f_2(t) = 0.03t(t > 10s)$.图中对比了本文所提出的最优故障检测滤波器方法和传统的观测方法的性能.传统方法所得残差 r_k 在有故障和无故障时的间隔距离较小,无法很清晰的通过设置阈值来进行区分,从而容易造成虚警和漏警.而本文所设计的滤波器能够较好克服网络传输延迟带来的负面影响,所给出的残差在有故障和无故障之间则有更大的间隔,易于检测出故障,尤其对检测早期的小故障效果更佳.



(a) 在10s处,阶跃量为0.2时,遭受突发故障的残差 r_k



(b) 在10s处,遭受初期故障的残差 r_k

图4 不同故障类型对应的残差情况

6 结束语

本文研究了无线网络控制系统的故障检测滤波器的优化设计,旨在减少网络延迟对网络控制系统及其故障检测器的影响.本文将网络延迟的影响建模为一个外部扰动,推导了传递函数矩阵用以描述残差信号与扰动、故障信号之间的函数关系,然后将故障检测滤波器的矩阵增益和传递函数矩阵分解为特征根 λ_i 和一组自由参数 q_i 的函数,进而提出了扰动鲁棒性和故障/灵敏性的目标函数用以优化故障检测性能.同时提出了一个对未知扰动的频率估计方法,用以减少计算复杂度.混合 MATLAB/NS2 的仿真验证了所提设计的有效性,有效地减少了网络延迟对故障检测的影响,有利于早期小故障的检测.

参考文献

[1] 游科友,谢立华.网络控制系统的最新研究综述[J].自动

- 化学报, 2013, 39(2): 101 – 118.
- You Ke-you, Xie Li-hua. Survey of recent progress in networked control systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(2): 101 – 118. (in Chinese)
- [2] 易军, 石为人, 唐云建, 等. 无线传感器/执行器网络任务动态调度策略[J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1239 – 1244.
- Yi Jun, Shi Wei-ren, Tang Yun-jian, et al. A dynamic task scheduling for wireless sensor and actuator networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6): 1239 – 1244. (in Chinese)
- [3] Ding S X, Zhang P, Shen Y, et al. An integrated design framework of fault-tolerant wireless networked control systems for industrial automatic control applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 462 – 471.
- [4] Zhang L, Gao H, Kaynak O. Network-induced constraints in networked control systems—A survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 403 – 416.
- [5] 蔡云泽, 潘宁, 许晓鸣. 具有长时延及丢包的网络控制系统 H^∞ 鲁棒滤波[J]. 控制与决策, 2010, 25(12): 1826 – 1830.
- Cai Yun-ze, Pan Ning, Xu Xiao-ming. H^∞ filtering for networked control systems with long time-delay and data packet dropout[J]. Control and Decision, 2010, 25(12): 1826 – 1830. (in Chinese)
- [6] 刘金良. 一类网络环境下的离散线性系统的可靠性滤波器设计研究[J]. 电子学报, 2012, 40(12): 2557 – 2561.
- Liu Jin-liang. Network-based reliable filter design for a class of discrete linear systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(12): 2557 – 2561. (in Chinese)
- [7] 侯彦东, 文成林, 陈志国. 多传感器故障检测与隔离的残差产生器设计方法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(2): 429 – 434.
- Hou Yan-dong, Wen Cheng-lin, Chen Zhi-guo. Designing method of residual generator for multi-sensor fault detection and isolation[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(2): 429 – 434. (in Chinese)
- [8] Ye H, He R, Liu H, et al. A new approach for fault detection of networked control systems[A]. Proceedings of the IFAC 14th Symposium on System Identification[C]. Newcastle, Australia: IFAC, 2006. 654 – 659.
- [9] Katsuhiko O. Modern Control Engineering (5th edition)[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2009. 30 – 32, 751 – 753.
- [10] Liao Y, Dai X W, Liu G Y, et al. Fault detection and eigenstructure optimization in IEEE 802.11 wireless sensor actuator networks for building automation[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2013, 27(9): 793 – 808.
- [11] Patton R J, Chen J. On eigenstructure assignment for robust fault diagnosis[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2000, 10(14): 1193 – 1208.
- [12] Dai X W, Breikin T, Gao Z W, et al. Disturbance attenuation in fault detection of gas turbine engines: a discrete robust observer design[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2009, 39(2): 234 – 239.

作者简介



廖勇 男, 1982 年出生于四川省自贡市. 2014 年毕业于重庆大学, 获博士学位, 现为该校讲师, 从事宽带无线网络通信、飞行器测控与通信等领域研究工作.

E-mail: liaoy@cqu.edu.cn



代学武 男, 1976 年出生于四川省隆昌县, 博士. 从事智能信号处理、动态系统(航空发动机)故障检测、无线传感器执行器网络和时间同步等领域研究工作, 在 IEEE Transactions on Automatic Control 等期刊和会议上发表论文 30 余篇, 出版专著一部.

E-mail: daixuewu@swu.edu.cn