

控制与决策

Control and Decision

基于诊断观测器的最优事件触发故障检测

吴劲松, 邱爱兵, 顾菊平, 姜旭

引用本文:

吴劲松, 邱爱兵, 顾菊平, 姜旭. 基于诊断观测器的最优事件触发故障检测[J]. *控制与决策*, 2024, 39(2): 559–567.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0775>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于动态观测器零极点优化的网络控制系统故障检测

Pole-zero optimization design of dynamic observer for fault detection of networked control systems

控制与决策. 2021, 36(6): 1351–1360 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1107>

基于向量集逆区间滤波的故障观测器设计

Vector set inversion interval filtering based fault observer design

控制与决策. 2021, 36(12): 2973–2981 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0212>

高超声速飞行器间歇故障改进自适应容错控制

Improved adaptive fault-tolerant control of intermittent faults in hypersonic flight vehicle

控制与决策. 2021, 36(11): 2627–2636 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0483>

基于周期动态事件触发的网络化切换系统的分析与控制

The analysis and control for networked switched systems based on periodic event-trigger

控制与决策. 2021, 36(10): 2467–2474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0281>

事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 H_∞ 故障检测

Event-triggered H_∞ fault detection for networked control systems with distributed delays

控制与决策. 2020, 35(12): 3059–3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

基于诊断观测器的最优事件触发故障检测

吴劲松, 邱爱兵[†], 顾菊平, 姜旭

(南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 提出一种基于诊断观测器的最优事件触发故障检测方法. 首先, 针对自适应混合事件触发下的远程监控系统, 发展一种数值代数结合型的低阶诊断观测器参数矩阵计算方法, 以满足残差生成中的 Luenberger 条件; 然后, 通过评估事件触发传输误差、干扰和故障对残差信号的影响, 构建 H_∞/H_∞ 型性能指标, 并利用互内外分解技术设计最优后置滤波器, 以实现对故障灵敏度和对干扰鲁棒性的最优权衡; 进一步, 为降低传统的预设残差阈值方法的保守性, 依据系统初始状态和干扰的有界性, 采用基于中心对称多胞体的方法设计残差评价函数及相应的故障决策逻辑来实现故障检测; 最后, 通过多车跟踪系统的仿真, 验证所提方法的有效性.

关键词: 诊断观测器; 事件传输误差; 故障检测; 鲁棒性; 灵敏度; 权衡

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0775

引用格式: 吴劲松, 邱爱兵, 顾菊平, 等. 基于诊断观测器的最优事件触发故障检测 [J]. 控制与决策, 2024, 39(2): 559-567.

Optimal event-triggered fault detection based on diagnostic observer

WU Jing-song, QIU Ai-bing[†], GU Ju-ping, JIANG Xu

(School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: An optimal event-triggered fault detection method based on diagnostic observer is proposed. Firstly, a low-order diagnostic observer parameter matrix calculation method combining a numerical approach and an algebraic approach is developed to satisfy Luenberger conditions in residual generation for the remote monitoring system which is triggered by adaptive mixed event-triggered mechanism. Then, the H_∞/H_∞ performance index is constructed by evaluating the influence of event-triggered transmission error, disturbance and fault on residual signal, and the optimal post-filter is designed by using the co-inner-outer factorization technology to achieve the optimal trade-off between fault sensitivity and disturbance robustness. Further, in order to reduce the conservatism of the traditional preset residual threshold method, according to the boundedness of disturbance and initial system status, the residual evaluation function and the corresponding fault decision logic are designed based on zonotope to realize fault detection. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation of the multi-vehicle tracking system.

Keywords: diagnostic observer; event-triggered transmission error; fault detection; robustness; sensitivity; trade-off

0 引言

网络控制系统因其安装简单、灵活、成本低等显著优势, 在实践中得到了广泛的关注和应用^[1]. 针对这类系统, 迫切需要高效使用有限的网络和计算资源, 从而促使了事件触发技术的诞生^[2-3]. 与传统时间触发技术相比, 事件触发技术只有在满足预先设定好的触发条件时, 才将数据从传感器传输至控制器或滤波器, 使得网络资源仅在需要时被占用, 所以这种技术的平均采样频率比传统时间触发技术的任务频率

要低得多, 可以极大地减少网络资源的占有率^[4]. 基于以上优点, 一系列基于相对误差、绝对误差、自适应、自触发形式的事件触发技术已被提出应用于网络控制系统^[5-8], 并在多智能体系统、无人机系统等实际系统上验证了其优越性^[9-11]. 此外, 在实际运行过程中, 系统故障、执行器故障和传感器故障几乎不可避免, 严重的甚至会造成系统失稳, 导致灾难性的后果^[12]. 因此, 在网络控制系统框架下, 利用网络监测系统数据, 进而检测系统中潜在的故障至关重要. 然

收稿日期: 2022-05-06; 录用日期: 2022-08-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62273188, U2066203); 江苏省六大人才高峰项目(XYDXX-091); 南通市科技重点项目(MS22020030).

责任编辑: 吴立刚.

[†]通讯作者. E-mail: aibqiu@ntu.edu.cn.

而,远程监控系统由于事件触发技术的引入会损失部分本地系统的信息,致使故障诊断的难度增加.这激发了越来越多学者对事件触发故障诊断研究的关注^[13-14].

就基于模型的角度而言,故障检测过程一般是由残差生成和残差评价两步构成.其中,残差生成部分主要有故障检测滤波器、诊断观测器和等价空间3种实现形式^[15].文献[16]采用最优辨识方法设计了基于故障检测滤波器的事件触发故障检测方法.该方法通过增广故障系统和误差系统设计出一个故障检测滤波器来实现故障检测,需要故障估计误差对所有外部输入鲁棒,因而故障灵敏度欠佳.为此,文献[17]在事件触发机制框架下,通过引入 H_∞/H_∞ 型性能权衡指标,设计了最优形式的故障检测滤波器,并验证了权衡设计方法的故障检测效果优于最优辨识方法.进一步地,文献[18]构建了 H_i/H_∞ 型性能权衡指标,实现了基于事件触发的最优故障检测滤波器设计.相似地,文献[19]通过构建 H_2/H_2 型性能权衡指标设计了一种基于等价空间的最优事件触发故障检测方法.值得注意的是,上述研究都是基于故障检测滤波器或等价空间的形式来实现的,而对诊断观测器形式的故障诊断方法研究较少.相比于故障检测滤波器,诊断观测器具有阶次灵活的特点,其在降低计算量和故障诊断优化问题中具有重要作用^[20-21];相比于等价空间方法,诊断观测器无需存储过去的运行数据,更便于在线实现故障检测^[15].然而,在事件触发机制的约束下,诊断观测器既需满足Luenberger条件,又需权衡事件触发传输误差、干扰和故障的影响,这使得基于诊断观测器的事件触发故障检测具有挑战性.

残差评价作为基于模型故障检测中必不可少的部分,对故障检测性能的提升至关重要^[15].现有的残差评价方法大多根据经验预设残差阈值进行故障检测,不适用于实际的工程^[22-24].考虑实际工程受到的扰动往往是幅值有界的,一些学者提出了一种新的基于中心对称多胞体的残差评价方法^[25-27].该方法通过判断实际残差是否属于残差可行集进行故障检测,可以不依赖于预设的残差阈值,并能与事件触发机制的特性相契合,以实现事件传输误差影响的抑制.

综上,本文在事件触发机制约束下,针对扰动幅值有界系统,基于诊断观测器的最优事件触发故障检测方法开展研究,主要工作如下:1)提出一种数值代数结合型的低阶诊断观测器设计方法,并通过评估事件触发传输误差、干扰和故障对残差的影响来设计最优后置滤波器,有效权衡了残差信号对干扰的鲁棒

性和对故障的灵敏度;2)通过评估所提自适应混合事件触发机制对事件传输误差的影响,结合无故障误差动态系统中已知的变量范围,发展基于中心对称多胞体的残差评价机制实现故障检测.

1 系统描述

图1给出了基于诊断观测器的最优事件触发故障检测系统框架,主要由本地系统、事件生成器、通讯网络、零阶保持器(ZOH)、诊断观测器和残差评估器6大部分组成.其中,本地系统为如下离散线性时不变系统:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B_u u(k) + E_a d(k) + E_f f(k), \\ y(k) &= Cx(k) + D_u u(k) + F_a d(k) + F_f f(k). \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in \mathbf{R}^n$ 、 $u(k) \in \mathbf{R}^{n_u}$ 、 $d(k) \in \mathbf{R}^{n_d}$ 、 $f(k) \in \mathbf{R}^{n_f}$ 、 $y(k) \in \mathbf{R}^m$ 分别表示系统状态、控制输入、干扰、故障信号和输出测量信号,且系统初始状态满足 $|x(0) - p_0| \leq \bar{x}_0$,干扰满足 $|d(k)| \leq \bar{d}$, p_0 、 \bar{x}_0 、 \bar{d} 是已知向量, A 、 B_u 、 E_a 、 E_f 、 C 、 D_u 、 F_a 、 F_f 是已知适维的系统矩阵, $\text{rank}(C) = m \leq n$.

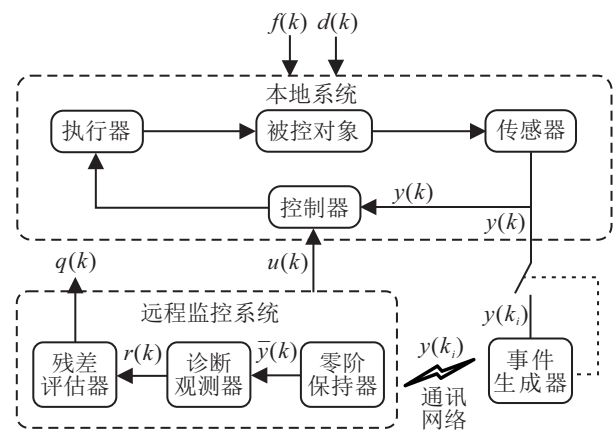


图1 基于诊断观测器的最优事件触发故障检测系统框架

在保证系统稳定性的前提下,为减少网络资源损耗并确保远程监控系统能适时感知本地系统信息,事件生成器采用如下自适应混合事件触发机制来判定是否传输本地系统的输出测量信号:

$$k_{i+1} = \min_{k_{\text{inf}} \leq k \leq k_{\text{sup}}} \{k | \exists g \in I : \Delta_g^2(k) > \delta_g(k) y_g^2(k)\}. \quad (2)$$

其中: k_{i+1} 为下一事件触发时刻, k_i 为上一事件触发时刻, $k_{\text{inf}} = k_i + h_k$ 为触发时刻的下界, h_k 为静默时间, $k_{\text{sup}} = k_i + \tau_{\text{max}}$ 为触发时刻的上界, τ_{max} 为最大事件触发间隔, $I = \{1, \dots, m\}$ 为含有 m 个数的集合, $\Delta_g(k) = y_g(k) - y_g(k_i)$, $\delta_g(k) \in (0, 1)$ 为自适应触发阈值,拆分输出测量信号 $y(k) = [y_1(k), \dots, y_g(k), \dots, y_m(k)]^T$,事件触发参数 $\delta(k) = \text{diag}\{\delta_1(k), \dots, \delta_g(k), \dots, \delta_m(k)\}$.

由于事件生成器的引入,采用ZOH将经通讯网络传输的非均匀本地系统输出测量信号转变成均匀信号,使其满足

$$\bar{y}(k) = y(k_i), \forall k \in [k_i, k_{i+1}), \quad (3)$$

其中 $\bar{y}(k)$ 表示经ZOH处理后的 k_i 时刻本地系统输出测量信号.

为降低残差生成的计算量,采用阶次灵活的诊断观测器进行残差生成,并给出如下低阶形式的诊断观测器:

$$\xi(k+1) = G\xi(k) + Hu(k) + L\bar{y}(k), \quad (4)$$

$$r_r(k) = V\bar{y}(k) - W\xi(k) - Qu(k). \quad (5)$$

其中: $\xi(k) \in \mathbf{R}^s$ ($s < n$)表示观测器状态; $r_r(k) \in \mathbf{R}^m$ 表示滤波前的残差信号. G 、 H 、 L 、 V 、 W 、 Q 以及变阶过程中需引入的矩阵 T 表示待设计的观测器参数矩阵,并为使生成的残差信号与控制输入 $u(k)$ 解耦以满足基本的残差生成条件,这些待设计的参数矩阵必须满足著名的Luenberger条件:

1) G 是稳定的; (6)

2) $TA - GT = LC, H = TB_u - LD_u$; (7)

3) $VC - WT = 0, Q = VD_u$. (8)

进一步,为提升残差信号对干扰的鲁棒性和对故障的灵敏度,引入后置滤波器来优化残差信号,并将优化过程表示如下:

$$r(k) = R(k) * r_r(k). \quad (9)$$

其中:符号“*”表示卷积运算, $R(k)$ 表示待设计的最优后置滤波器, $r(k) \in \mathbf{R}^m$ 表示滤波后的残差信号.

本文的设计目标: 1)在自适应混合事件触发机制(2)的约束下,设计诊断观测器(4)、(5)的参数矩阵生成算法以满足Luenberger条件(6)、(7)、(8); 2)通过构建性能权衡指标求解出式(9)中的最优后置滤波器 $R(k)$ 来提升残差信号对故障的灵敏度和对干扰的鲁棒性; 3)考虑事件传输误差的影响,设计出基于多胞体的残差评价方法来实现故障检测.

注1 与文献[17]相比,本文采用的自适应混合事件触发机制通过判断单个传感器的测量值是否满足触发条件来决定是否传输整体输出测量信号,可避免传感器数量过多导致的高维计算.同时,在机制中引入的上下界对触发间隔进行了约束,可有效避免“芝诺现象”,并能确保远程监控系统适时地感知本地系统信息.

注2 当式(2)中的触发条件被连续满足时,因有静默时间的存在,事件触发将转变为以静默时间为周期的时间触发方式;当事件触发间隔在静默时间和

最大事件触发间隔之间时,仅根据式(2)中的触发条件判断是否进行数据传输;当式(2)中的触发条件长时间未被满足时,事件触发将转变为以最大事件触发间隔为周期的时间触发方式.

2 最优诊断观测器设计

2.1 诊断观测器

针对诊断观测器中参数矩阵所需满足的Luenberger条件,本文提出一种数值代数结合型的方法用于参数矩阵生成,并总结为算法1.

定理1 若矩阵 $v_s = [v_{s,0} \ v_{s,1} \ \dots \ v_{s,s}]$ 满足

$$v_s [C^T \ (CA)^T \ \dots \ (CA^s)^T]^T = 0, \quad (10)$$

且存在一组向量

$$G_g = [g_1 \ g_2 \ \dots \ g_s]^T \quad (11)$$

满足矩阵

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & g_1 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & g_2 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & 0 & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & g_s \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{s \times s} \quad (12)$$

是稳定的,那么满足Luenberger条件的诊断观测器参数矩阵 T 、 H 、 L 分别为以下形式:

$$T = \begin{bmatrix} v_{s,1} & v_{s,2} & \dots & v_{s,s-1} & v_{s,s} \\ v_{s,2} & \dots & \dots & v_{s,s} & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ v_{s,s} & 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{s-2} \\ CA^{s-1} \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$H = \begin{bmatrix} v_{s,0} + g_1 v_{s,s} & v_{s,1} & v_{s,2} & \dots & v_{s,s-1} & v_{s,s} \\ v_{s,1} + g_2 v_{s,s} & v_{s,2} & \dots & \dots & v_{s,s} & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ v_{s,s-1} + g_s v_{s,s} & v_{s,s} & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} H_D,$$

$$H_D = [D_u^T \ (CB_u)^T \ (CAB_u)^T \ \dots \ (CA^{s-1}B_u)^T]^T; \quad (14)$$

$$L = -[v_{s,0}^T \ v_{s,1}^T \ \dots \ v_{s,s-1}^T]^T - G_g v_{s,s}. \quad (15)$$

其余的参数矩阵 V 、 W 、 Q 依据以下等式生成:

$$WTC_N^T = 0, \quad (16)$$

$$V = WTC^T(CC^T)^{-1}, \quad (17)$$

$$Q = VD_u, \quad (18)$$

其中 C_N^T 表示矩阵 C 的零矩阵($CC_N^T = 0, C_N \in \mathbf{R}^{(n-m) \times n}$).

证明 根据式(11)和(12), Luenberger条件(6)显然满足. 再依据式(10)计算 $TA - GT$, 可知 $TA - GT = LC$. 进而, 由式(14)和(15)可得 $H = TB_u - LD_u$. 因此, Luenberger条件(7)满足. 对于Luenberger条件(8), 依据式(16)可得 $WTC_N^T = VCC_N^T$, 再将式(17)两边同时右乘 CC^T 可得 $VCC^T = WTC^T$, 进而可知 $VC = WT$, 并结合式(18)即可得证. \square

算法1 诊断观测器参数矩阵生成算法.

step 1: 求 v_s 满足式(10), 设计 G_g 满足式(12)稳定;

step 2: 依据式(13)~(15)计算 T 、 H 和 L ;

step 3: 求 C 的零矩阵 C_N^T , 并依据式(16)求出 W ;

step 4: 依据式(17)、(18)计算 V 和 Q , 完成.

注3 诊断观测器的参数矩阵 T 、 H 和 L 通过将设计的 v_s 、 G_g 代入式(13)~(15)进行数值计算即可生成, 而参数矩阵 V 、 W 、 Q 需要依靠式(16)~(18)进行代数运算才可获得. 因此, 上述算法被称为数值代数结合型的方法. 数值设计部分因计算简单的特点, 降低了 T 、 H 和 L 的设计难度; 代数设计部分, 由于可通过设计不同维数的 W 来改变残差信号的维数, 进而提升残差生成的设计自由度.

2.2 最优后置滤波器

众所周知, 残差生成的优劣取决于残差对故障的灵敏度和对干扰的鲁棒性. 这一特性表明构建性能权衡指标求解出最优后置滤波器来优化残差, 实现残差兼顾灵敏度和鲁棒性的权衡设计至关重要.

首先, 定义估计误差向量 $e(k) = Tx(k) - \xi(k)$ 和事件传输误差向量 $\bar{e}_y(k) = \bar{y}(k) - y(k)$, 则可得到如下误差系统:

$$e(k+1) = Ge(k) + (TE_d - LF_d)d(k) + (TE_f - LF_f)f(k) - L\bar{e}_y(k), \quad (19)$$

$$r(k) = R(k) * [We(k) + VF_d d(k) + VF_f f(k) + V\bar{e}_y(k)]. \quad (20)$$

对式(20)进行 Z 变换, 可得

$$r(z) = R(z)[G_{d,r}(z)d(z) + G_{f,r}(z)f(z) + G_{\bar{e}_y,r}(z)\bar{e}_y(z)]. \quad (21)$$

其中

$$\begin{aligned} G_{d,r}(z) &= W(zI - G)^{-1}(TE_d - LF_d) + VF_d, \\ G_{f,r}(z) &= W(zI - G)^{-1}(TE_f - LF_f) + VF_f, \\ G_{\bar{e}_y,r}(z) &= W(zI - G)^{-1}(-L) + V. \end{aligned}$$

其次, 在无故障无输入情形下, 借助事件触发机制(2)及事件传输误差 $\bar{e}_y(k)$ 的定义, 量化分析干扰对残差

生成的影响:

$$\begin{aligned} \|r_d(k)\|_2 &= \sup_{f=0, u=0} \|r(k)\|_2 \leq \\ &\|R(z)G_{d,r}(z)\|_\infty \|d(k)\|_2 + \\ &\|R(z)G_{\bar{e}_y,r}(z)\|_\infty \|\bar{e}_y(k)\|_2 \leq \\ &\|R(z)G_{d,r}(z)\|_\infty \|d(k)\|_2 + \\ &\sqrt{\delta(k)} \|R(z)G_{\bar{e}_y,r}(z)\|_\infty \|y(k)\|_2 \leq \\ &\|R(z)G_{d,r}(z)\|_\infty \|d(k)\|_2 + \\ &\gamma_d \sqrt{\delta(k)} \|R(z)G_{\bar{e}_y,r}(z)\|_\infty \|d(k)\|_2 \leq \\ &2\|R(z)[G_{d,r}(z), \gamma_d \sqrt{\delta(k)} G_{\bar{e}_y,r}(z)]\|_\infty \|d(k)\|_2. \end{aligned}$$

其中: $\gamma_d = \|G_d(z)\|_\infty$, $G_d(z) = F_d + C(zI - A)^{-1}E_d$. 再在无干扰无输入的情形下, 量化分析故障对残差生成的影响:

$$\begin{aligned} \|r_f(k)\|_2 &= \sup_{d=0, u=0} \|r(k)\|_2 \leq \\ &2\|R(z)[G_{f,r}(z), \gamma_f \sqrt{\delta(k)} G_{\bar{e}_y,r}(z)]\|_\infty \|f(k)\|_2. \end{aligned}$$

其中: $\gamma_f = \|G_f(z)\|_\infty$, $G_f(z) = F_f + C(zI - A)^{-1}E_f$. 进而, 可通过构建如下比值型的性能权衡指标将基于诊断观测器的残差生成器设计问题转化为一个优化问题, 从而通过求出的最优后置滤波器实现生成残差对故障灵敏度和对干扰鲁棒性之间的权衡:

$$\begin{aligned} \min_{R(z)} J(R(z)) &= \\ \min_{R(z)} \frac{\|R(z)[G_{d,r}(z), \gamma_d \sqrt{\delta(k)} G_{\bar{e}_y,r}(z)]\|_\infty}{\|R(z)[G_{f,r}(z), \gamma_f \sqrt{\delta(k)} G_{\bar{e}_y,r}(z)]\|_\infty}. \quad (22) \end{aligned}$$

定理2 给定系统矩阵 A 、 B_u 、 E_d 、 E_f 、 C 、 D_u 、 F_d 、 F_f 和诊断观测器参数矩阵 G 、 T 、 H 、 L 、 V 、 W 、 Q , 则满足优化问题(22)的最优后置滤波器为

$$R(z) = M_o - M_o W(zI - G + L_o W)^{-1} L_o. \quad (23)$$

其中

$$\begin{aligned} M_o &= \left([VF_d, \gamma_d \sqrt{\delta(k)} V] \begin{bmatrix} F_d^T V^T \\ \gamma_d \sqrt{\delta(k)} V^T \end{bmatrix} + W X W^T \right)^{-\frac{1}{2}}, \\ L_o &= \left([TE_d - LF_d, -\gamma_d L \sqrt{\delta(k)}] \begin{bmatrix} F_d^T V^T \\ \gamma_d \sqrt{\delta(k)} V^T \end{bmatrix} + G X W^T \right) \cdot \left([VF_d, \gamma_d \sqrt{\delta(k)} V] \begin{bmatrix} F_d^T V^T \\ \gamma_d \sqrt{\delta(k)} V^T \end{bmatrix} + W X W^T \right)^{-1}. \end{aligned}$$

X 是以下离散 Riccati 方程的稳定解:

$$GXG^T + [TE_d - LF_d, -\gamma_d L \sqrt{\delta(k)}] \begin{bmatrix} (TE_d - LF_d)^T \\ -\gamma_d \sqrt{\delta(k)} L^T \end{bmatrix} - X - \left([TE_d - LF_d, -\gamma_d L \sqrt{\delta(k)}] \begin{bmatrix} F_d^T V^T \\ \gamma_d \sqrt{\delta(k)} V^T \end{bmatrix} \right) + GXW^T \left([VF_d, \gamma_d \sqrt{\delta(k)} V] \begin{bmatrix} F_d^T V^T \\ \gamma_d \sqrt{\delta(k)} V^T \end{bmatrix} + W X W^T \right) \left([VF_d, \gamma_d \sqrt{\delta(k)} V] \begin{bmatrix} (TE_d - LF_d)^T \\ -\gamma_d \sqrt{\delta(k)} L^T \end{bmatrix} + W X G^T \right) = 0.$$

证明 在求解式(22)的过程中,为简化计算,定义

$$\begin{aligned} G_{d\bar{e}_y,r}(z) &= [G_{d,r}(z), \gamma_d \sqrt{\delta(k)} G_{\bar{e}_y,r}(z)] = \\ &W(zI - G)^{-1} [TE_d - LF_d, -\gamma_d L \sqrt{\delta(k)}] + \\ &[VF_d, \gamma_d \sqrt{\delta(k)} V], \\ G_{f\bar{e}_y,r}(z) &= [G_{f,r}(z), \gamma_f \sqrt{\delta(k)} G_{\bar{e}_y,r}(z)] = \\ &W(zI - G)^{-1} [TE_f - LF_f, -\gamma_f L \sqrt{\delta(k)}] + \\ &[VF_f, \gamma_f \sqrt{\delta(k)} V], \end{aligned}$$

则性能权衡指标(22)可进一步写为

$$\min_{R(z)} J(R(z)) = \min_{R(z)} \frac{\|R(z)G_{d\bar{e}_y,r}(z)\|_\infty}{\|R(z)G_{f\bar{e}_y,r}(z)\|_\infty}. \quad (24)$$

再对增广系统 $G_{d\bar{e}_y,r}(z)$ 应用互内外分解技术^[17], 使得 $G_{d\bar{e}_y,r}(z) = G_{dco}(z)G_{dci}(z)$, 并令 $R(z) = Q(z)G_{dco}^{-1}(z)$, 其中 $Q(z) \in \mathcal{RH}_\infty$ 表示一个任意系统. 由于互内因子 $G_{dci}(z)$ 满足 $G_{dci}(z)G_{dci}^*(z) = I$, 依据范数不等式定理, 可得不等关系式

$$\begin{aligned} \min_{R(z)} J(R(z)) &= \min_{R(z)} \frac{\|R(z)G_{d\bar{e}_y,r}(z)\|_\infty}{\|R(z)G_{f\bar{e}_y,r}(z)\|_\infty} = \\ \min_{R(z)} \frac{\|Q(z)G_{dco}^{-1}(z)G_{dco}(z)G_{dci}(z)\|_\infty}{\|Q(z)G_{dco}^{-1}(z)G_{f\bar{e}_y,r}(z)\|_\infty} &= \\ \min_{R(z)} \frac{\|Q(z)\|_\infty}{\|Q(z)G_{dco}^{-1}(z)G_{f\bar{e}_y,r}(z)\|_\infty} &\geq \\ \frac{1}{\|G_{dco}^{-1}(z)G_{f\bar{e}_y,r}(z)\|_\infty}. \end{aligned} \quad (25)$$

观察不等式(25)可知, 只有当 $Q(z)$ 取单位阵时, 等号才成立, 因此 $R(z) = G_{dco}^{-1}(z)$ 是性能权衡指标(24)的最优解, 则最优后置滤波器 $R(z)$ 对应的具体形式为式(23). \square

注4 在诊断观测器的参数设计过程中已经将系统参数矩阵 G, H, L, V, W, Q 设计完成, 上述建立的性能指标(22)仅寻求最优的后置滤波器 $R(z)$, 使得基于诊断观测器生成的残差信号兼顾对故障的灵敏度和对干扰的鲁棒性.

2.3 基于多胞体的残差评价

从残差信号中检测出系统故障, 下面将给出不依赖预设残差阈值的基于中心对称多胞体的残差评

价方法. 首先给出如下对残差 $r(k)$ 所在中心对称多胞体 Υ_r 界定推导非常重要的定义和引理.

定义1 q 阶中心对称多胞体 $\Upsilon \in \mathbf{R}^n$ 是 q 维超立方体 $E^q = [-1, 1]^q$ 在 \mathbf{R}^n 上的仿射变换, 有

$$\Upsilon = \langle c, H \rangle = c \oplus HE^q = \{c + He : e \in E^q\}.$$

其中: $c \in \mathbf{R}^n$ 表示中心对称多胞体的中心, $H \in \mathbf{R}^{n \times q}$ 表示生成矩阵, 符号 “ \oplus ” 表示 Minkowski 和.

定义2 给定 q 阶中心对称多胞体 $\Upsilon = \langle p, H \rangle \in \mathbf{R}^n$, 区间壳 $rs(H) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是对角矩阵, 其中 $rs(H)_{i,i} = \sum_{j=1}^q |H_{i,j}|, i = 1, 2, \dots, n$.

引理1 给定 q 阶中心对称多胞体 $\Upsilon_1 = \langle c_1, H_1 \rangle, \Upsilon_2 = \langle c_2, H_2 \rangle, \Upsilon = \langle c, H \rangle$, 以下关系成立:

$$\Upsilon_1 \oplus \Upsilon_2 = \langle c_1 + c_2, [H_1 \ H_2] \rangle,$$

$$F \odot \Upsilon = \langle Fc, FH \rangle,$$

$$\Upsilon \subseteq \langle c, rs(H) \rangle.$$

其中: 向量 $c, c_1, c_2 \in \mathbf{R}^n$, 矩阵 $H, H_1, H_2 \in \mathbf{R}^{n \times q}$, 矩阵 $F \in \mathbf{R}^{l \times n}$, 符号 “ \odot ” 表示映射.

通过引入新残差状态变量 $x_r(k)$, 依据误差系统(19)、(20)及最优后置滤波器(23)的形式, 得出无故障时的误差动态系统

$$\begin{aligned} \hat{e}(k+1) &= \hat{G}_e \hat{e}(k) + \hat{G}_d d(k) - \hat{G}_{e_y} \bar{e}_y(k), \\ r(k) &= \hat{r}_e \hat{e}(k) + M_o V F_d d(k) + M_o V \bar{e}_y(k). \end{aligned} \quad (26)$$

其中

$$\hat{e}(k) = [e(k)^T \ x_r(k)^T]^T, \hat{r}_e = [M_o W \ M_o W],$$

$$\hat{G}_e = \begin{bmatrix} G & 0 \\ -L_o W & G - L_o W \end{bmatrix},$$

$$\hat{G}_d = \begin{bmatrix} TE_d - LF_d \\ -L_o V F_d \end{bmatrix}, \hat{G}_{e_y} = \begin{bmatrix} L \\ L_o V \end{bmatrix}.$$

由系统描述可知, 系统状态 $x(0)$ 和干扰 $d(k)$ 为

$$x(0) \in \Upsilon_x = \langle p_0, H_x \rangle,$$

$$d(k) \in \Upsilon_d = \langle 0, H_d \rangle.$$

其中: $H_x = \text{diag}\{\bar{x}_0\}, H_d = \text{diag}\{\bar{d}\}$. 此外, 假设新估计误差

$$\hat{e}(k) \in \Upsilon_e(k) = \langle P_e(k), H_e(k) \rangle,$$

其中 $P_e(k)$ 和 $H_e(k)$ 分别表示新估计误差中心对称多胞体的中心和生成矩阵, 且设初始状态 $\hat{e}(0) \in$

$\mathcal{Y}_{\bar{e}}(k) = \langle 0, H_{\bar{e}}(0) \rangle$. 为界定事件传输误差 $\bar{e}_y(k)$ 中中心对称多胞体, 依据事件触发机制(2)得不等式

$$\bar{e}_{y,g}^2(k) \leq \delta_g(k) y_g^2(k) \leq \frac{\delta_g(k)}{(1 - \sqrt{\delta_g(k)})^2} y_g^2(k_i),$$

那么可知 $\bar{e}_y(k)$ 界于如下中心对称多胞体:

$$\bar{e}_y(k) \in \mathcal{Y}_{\bar{e}_y} = \langle 0, H_{\bar{e}_y} \rangle,$$

其中

$$H_{\bar{e}_y} = \text{diag} \left\{ \sqrt{\frac{\delta_g(k)}{(1 - \sqrt{\delta_g(k)})^2}} y_g^2(k_i) \right\}.$$

进而可得 $k + 1$ 时刻新估计误差 $\hat{e}(k + 1)$ 和残差 $r(k + 1)$ 对应的中心对称多胞体

$$\hat{e}(k + 1) \in \mathcal{Y}_{\hat{e}}(k + 1) = \langle P_{\hat{e}}(k + 1), H_{\hat{e}}(k + 1) \rangle,$$

$$r(k + 1) \in \mathcal{Y}_r(k + 1) = \langle P_r(k + 1), H_r(k + 1) \rangle,$$

$$\mathcal{Y}_{\hat{e}}(k + 1) =$$

$$\widehat{G}_e \odot \mathcal{Y}_{\hat{e}}(k) \oplus \widehat{G}_d \odot \mathcal{Y}_d \oplus (-\widehat{G}_{e_y}) \odot \mathcal{Y}_{\bar{e}_y},$$

$$\mathcal{Y}_r(k + 1) =$$

$$\widehat{r}_e \odot \mathcal{Y}_{\hat{e}}(k + 1) \oplus M_o V F_d \odot \mathcal{Y}_d \oplus M_o V \odot \mathcal{Y}_{\bar{e}_y}. \quad (27)$$

依据引理1可得

$$P_{\hat{e}}(k + 1) = \widehat{G}_e P_{\hat{e}}(k),$$

$$P_r(k + 1) = \widehat{r}_e \widehat{G}_e P_e(k),$$

$$H_{\hat{e}}(k + 1) = [\widehat{G}_e \kappa_s(H_{\hat{e}}(k)), \widehat{G}_d H_d, -\widehat{G}_{e_y} H_{\bar{e}_y}],$$

$$H_r(k + 1) = [\widehat{r}_e H_{\hat{e}}(k + 1), M_o V F_d H_d, M_o V H_{\bar{e}_y}],$$

其中 $\kappa_s(\cdot)$ 是降阶算子. 主要思想是通过选择合适的阶次 x_s 来实现估计精度和迭代运算复杂度间的权衡, 从而确保基于中心对称多胞体故障检测方法的实用性, 该运算流程可参考文献[25-27].

根据上述基于中心对称多胞体残差评价生成的阶次有限的 $\mathcal{Y}_r(k)$, 本文采用中心对称多胞体的区间壳来构建故障决策逻辑, 具体如下:

$$\begin{cases} \forall |r_i(k)| \leq \sum_{l=1}^{n_s} |H_{i,l}(k)| \Rightarrow q(k) = 0, \\ \exists |r_i(k)| > \sum_{l=1}^{n_s} |H_{i,l}(k)| \Rightarrow q(k) = 1. \end{cases} \quad (28)$$

其中: n_s 表示 $H_r(k)$ 的列数, $r_i(k)$ 表示 $r(k)$ 的第 i 个元素, $H_{i,l}(k)$ 表示矩阵 $H_r(k)$ 的第 i 行第 l 列的元素; $q(k)$ 是故障标志, $q(k) = 1$ 表示故障, $q(k) = 0$ 表示无故障. 实际中采用 $r_i^{\text{sup}}(k) = \sum_{l=1}^{n_s} |H_{i,l}(k)|$ 和 $r_i^{\text{low}}(k)$

$$= -\sum_{l=1}^{n_s} |H_{i,l}(k)| \text{ 进行故障检测.}$$

注5 降阶算子 $\kappa_s(\cdot)$ 和故障决策逻辑(28)虽然

使故障检测的保守性增加, 但其能够有效降低故障检测的运算复杂度, 从而提升方法的实用性.

3 仿真实验

本文以图2所示的多车跟踪系统为例, 验证基于诊断观测器的最优事件触发故障检测方法具有较好的故障检测性能. 其中: $v_i(k)$ 为 i 车的速度, $w_i(k)$ 为 i 车的位置, $i = 1, 2, 3$.

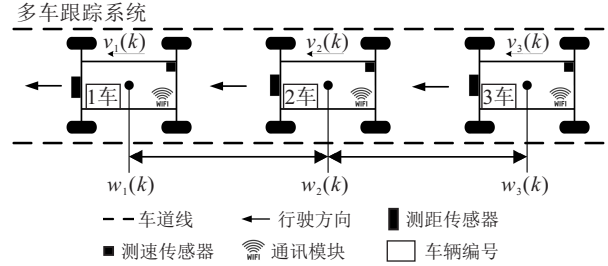


图2 3车单车道跟踪模型

3.1 多车跟踪模型

考虑图2所示的3车单车道跟踪模型, 设置系统状态变量为车辆实际移动速度与参考移动速度的偏差 $\delta v_i(k)$ ($i = 1, 2, 3$) 和车辆间实际距离与参考距离的偏差 $\delta w_i(k)$ ($i = 1, 2$), 控制变量为车辆电机电压的占比 δP_i ($i = 1, 2, 3$). 因此, 针对3车单车道跟踪模型的离散线性时不变系统中的状态变量矩阵可构建为 $x(k) = [\delta v_1(k) \ \delta w_1(k) \ \delta v_2(k) \ \delta w_2(k) \ \delta v_3(k)]^T$, 控制变量可构建为 $u(k) = [\delta P_1(k) \ \delta P_2(k) \ \delta P_3(k)]^T$.

考虑跟踪系统的代价函数为

$$J = \frac{1}{2} \sum_0^{\infty} \{x^T(k) Q_L x(k) + u^T(k) R_L u(k)\}.$$

其中: $x(k)$ 为系统状态, $u(k) = -R_L^{-1} B_u^T \hat{K} x(k)$ 为控制输入, R_L 为正定矩阵, Q_L 为半正定矩阵. \hat{K} 是如下代数等式的实对称常数矩阵解:

$$-\hat{K} A - A^T \hat{K} + \hat{K} B_u R_L^{-1} B_u^T \hat{K} - Q_L = 0.$$

因此, 跟踪模型的离散线性时不变系统可描述如下:

$$\begin{aligned} x(k + 1) &= (A - B_u R_L^{-1} B_u^T \hat{K}) \cdot x(k) + E_d d(k) + E_f f(k), \\ y(k) &= C x(k) + F_d d(k). \end{aligned}$$

3.2 模型参数

由文献[28]可知, 在不考虑干扰和故障的情况下, 连续时间的系统参数矩阵 A 、 B_u 、 Q_L 、 R_L 、 C 可分别设定为

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad B_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Q_L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

则在采样周期 $T_s = 0.1\text{s}$ 的情况下,经离散化计算过程可得如下离散时间的系统参数矩阵:

$$A - B_u R_L^{-1} B_u^T \hat{K} = \begin{bmatrix} 0.7908 & -0.2143 & 0.0730 & -0.0613 & 0.0411 \\ 0.0855 & 0.9806 & -0.0838 & 0.0050 & -0.0017 \\ 0.0730 & 0.1530 & 0.7589 & -0.1530 & 0.0730 \\ 0.0017 & 0.0050 & 0.0838 & 0.9806 & -0.0855 \\ 0.0411 & 0.0613 & 0.0730 & 0.2143 & 0.7908 \end{bmatrix}.$$

而在实际中,车辆跟踪必定会受到外部环境影响,车载传感器也存在测量噪声.甚至,车辆的速度控制器等执行器会出现故障,最终影响系统的运行.因此,本文考虑如下的扰动矩阵及其影响形式:

$$E_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0 & 0.9 & 0 \end{bmatrix}^T, F_d = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$d(k) = [0.1 \quad 0.01]^T \cdot \omega(k).$$

其中: $\omega(k) \in [0, 0.5]$ 表示随机扰动值,扰动矩阵对应的 $\gamma_d = 9.7219$.考虑车载速度控制存在加性故障,其对应的故障矩阵及影响形式如下:

$$E_f = [1, 0, 0, 0, 0]^T.$$

$$f(k) = \begin{cases} 0, & 0 \leq k < 50; \\ 0.5, & k \geq 50. \end{cases}$$

3.3 仿真结果

设定静默时间 $h_k = 1$,最大触发间隔 $\tau_{\max} = 5$,事件触发参数 $\delta(k) = \text{diag}\{0.01, 0.01\}$,降阶算子 $\kappa_s(\cdot)$ 的阶次 $x_s = 12$.选取诊断观测器的观测阶数 $s = 4$,则求解式(10)得一组左零空间: $v_{s,0} = [-0.4432, -0.1564]$, $v_{s,1} = [0.6060, 0.1937]$, $v_{s,2} = [0.1090, 0.2398]$, $v_{s,3} = [0.0119, -0.4141]$, $v_{s,4} = [-0.3364, 0.1420]$.再设定 $G_g = [0.5, 0, 0, 0]^T$,依据定理1可得观测器参数矩阵

$$T = \begin{bmatrix} -0.0512 & 0.4336 & 0.0340 & 0.1556 & 0.0173 \\ -0.0477 & -0.1919 & 0.0309 & -0.0397 & 0.0168 \\ -0.0285 & -0.3172 & 0.0401 & -0.2765 & -0.0116 \\ 0 & -0.3364 & 0 & 0.1420 & 0 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 0.6114 & 0.0854 \\ -0.6060 & -0.1937 \\ -0.1090 & -0.2398 \\ -0.0119 & 0.4141 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$V = \begin{bmatrix} 0.4451 & 0.1424 \\ -0.3364 & 0.1420 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$W = \begin{bmatrix} 0.6881 & -0.7252 & -0.0237 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

根据定理2可得

$$L_o = \begin{bmatrix} -0.2507 & 1.0849 \\ 1.1035 & -0.2113 \\ 0.0366 & 0.1447 \\ -1.3812 & -1.7902 \end{bmatrix},$$

$$M_o = \begin{bmatrix} 1.8197 & 0.9748 \\ 0.9748 & 3.6041 \end{bmatrix}.$$

运用基于中心对称多胞体的故障检测方法进行多车跟踪系统的故障检测.由图3可见,经滤波后的 $r_1(k)$ 和 $r_2(k)$ 均对故障具有更高的灵敏度.而对于干扰的鲁棒性,滤波后 $r_2(k)$ 较滤波前 $r_{r_2}(k)$ 的鲁棒性更强,滤波后 $r_1(k)$ 较滤波前 $r_{r_1}(k)$ 的鲁棒性却没有明显提升,这是由于后置滤波器在鲁棒性与灵敏度之间权衡设计的结果,其通过牺牲一点鲁棒性来进一步增强残差对故障的灵敏度,更便于故障的检测.由图4可见,在系统初始时刻和故障发生时刻,连续的事件触发均切换至以静默时间为周期的时间触发方式,有效避免了“芝诺现象”的发生.在故障发生后,事件触发函数长时间未被满足时,事件触发顺利切换至以最大触发间隔为周期的时间触发方式,有效预防了远程监控系统长时间失去本地系统的信息.同时,由图4可见,与采样周期为1的时间触发方式相比,本文采用的自适应混合事件触发机制能有效减少大约一半的数据传输次数.

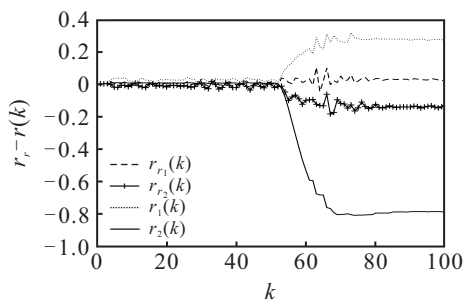


图3 滤波前后残差对比

由图5和图6可见,残差 $r_1(k)$ 和 $r_2(k)$ 在预设故障处均超出了阈值,验证了本文所提基于中心对称多胞体故障检测方法的有效性.另外,因为在基于中心对称多胞体的残差评价方法中,考虑了事件传输误差

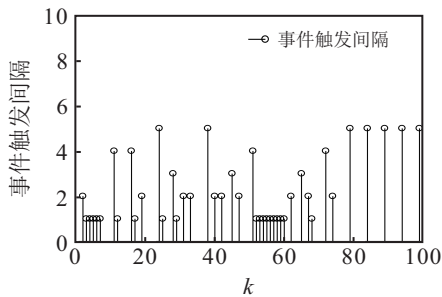


图4 事件触发间隔

$\bar{e}_y(k)$ 的影响,所以残差阈值在故障发生时会有所增大,从而抑制故障时事件传输误差带来的影响。此外,图7给出了全阶观测 ($s=5$) 与上述降阶观测 ($s=4$) 生成残差 $r_2(k)$ 的故障检测效果对比。由图7可见,在相同的干扰、预设故障下,两者的故障检测效果几乎一致,均可检测出系统故障。值得说明的是,降阶观测减少了观测矩阵的维数,显然其计算代价更小,更易被实际工程系统所接受。

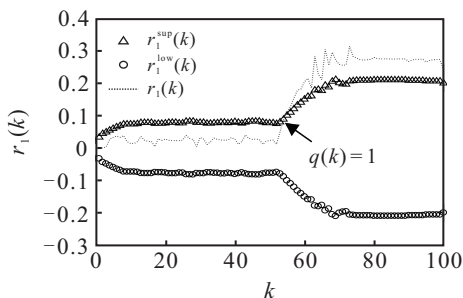
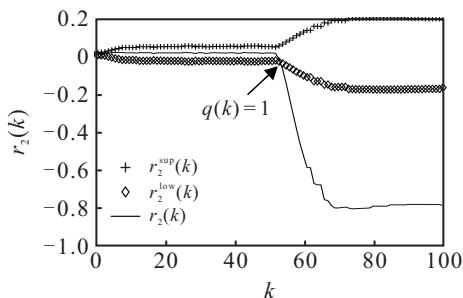
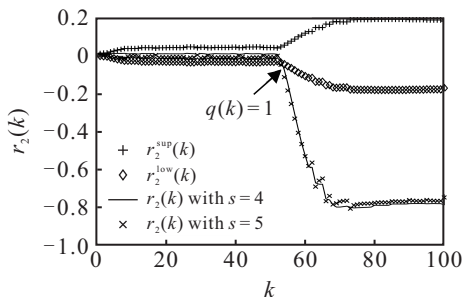
图5 $r_1(k)$ 故障检测效果图6 $r_2(k)$ 故障检测效果

图7 全阶与降阶观测的故障检测效果对比

4 结论

本文提出了一种基于诊断观测器的最优事件触发故障检测方法。通过设计的数值代数结合型的诊

断观测器参数矩阵计算方法,构建出满足Luenberger条件的诊断观测器;再结合自适应混合事件触发机制提出了一种考虑事件传输误差影响的 H_∞/H_∞ 型性能指标用以求解最优后置滤波器,巧妙地将故障灵敏度与干扰鲁棒性的权衡设计问题转化为性能指标的优化求解问题;进一步地,由于实际系统受到的干扰往往有界,本文采用可生成时变阈值的基于中心对称多胞体的残差评价机制来实现故障检测;最后,通过多车跟踪系统的仿真结果验证了所提方法的有效性。在接下来的工作中,计划搭建多车跟踪系统的实物平台,并研究固定通讯率下如何设计事件触发机制来提升故障检测性能的课题。

参考文献(References)

- [1] Wang X D, Fei Z Y, Yan H C, et al. Dynamic event-triggered fault detection via zonotopic residual evaluation and its application to vehicle lateral dynamics[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(11): 6952-6961.
- [2] Zhang X M, Han Q L, Zhang B L. An overview and deep investigation on sampled-data-based event-triggered control and filtering for networked systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(1): 4-16.
- [3] Meng X Y, Chen T W. Optimal sampling and performance comparison of periodic and event based impulse control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(12): 3252-3259.
- [4] 邱爱兵, 胡贤, 邱卫东, 等. 基于事件触发的故障诊断与动态调节集成设计[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(8): 1159-1166.
(Qiu A B, Hu X, Qiu W D, et al. An integrated design of event-triggered fault diagnosis and dynamic fault accommodation[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(8): 1159-1166.)
- [5] Wang Y L, Lim C C, Shi P. Adaptively adjusted event-triggering mechanism on fault detection for networked control systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(8): 2299-2311.
- [6] Ning Z K, Yu J Y, Pan Y N, et al. Adaptive event-triggered fault detection for fuzzy stochastic systems with missing measurements[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(4): 2201-2212.
- [7] Zou L, Wang Z D, Zhou D H. Event-based control and filtering of networked systems: A survey[J]. International Journal of Automation and Computing, 2017, 14(3): 239-253.
- [8] Fei Z Y, Guan C X, Gao H J, et al. Exponential synchronization of networked chaotic delayed neural network by a hybrid event trigger scheme[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29(6): 2558-2567.
- [9] Xu Y, Wu Z G. Distributed adaptive event-triggered

- fault-tolerant synchronization for multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(2): 1537-1547.
- [10] Yan H C, Sun J Y, Zhang H, et al. Event-triggered H_∞ state estimation of 2-DOF quarter-car suspension systems with nonhomogeneous Markov switching[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(9): 3320-3329.
- [11] Li S, Li Z, Li J, et al. Application of event-triggered cubature Kalman filter for remote nonlinear state estimation in wireless sensor network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 5133-5145.
- [12] 杨光红, 张志慧. 基于区间观测器的动态系统故障诊断技术综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 769-781. (Yang G H, Zhang Z H. Review of interval observer based fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 769-781.)
- [13] Qiu A B, Jiang B, Wen C L, et al. Fault estimation and accommodation for networked control systems with nonuniform sampling periods[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2015, 29(4): 427-442.
- [14] Qiu A B, Zhang J, Gu J P. An uncertainty-based approach to discrete-time fault estimation observer design for nonuniformly sampled systems[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2017, 15(4): 1651-1660.
- [15] Ding S. Model-based fault diagnosis techniques: Design schemes, algorithms, and tools[M]. Berlin: Springer, 2013.
- [16] Wu T B, Li F B, Yang C H, et al. Event-based fault detection filtering for complex networked jump systems[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(2): 497-505.
- [17] Qiu A B, Al-Dabbagh A W, Chen T W. A tradeoff approach for optimal event-triggered fault detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2111-2121.
- [18] Zhong M Y, Ding S X, Zhou D H, et al. An H_i/H_∞ optimization approach to event-triggered fault detection for linear discrete time systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 65(10): 4464-4471.
- [19] Qiu A B, Ji X L, Wang S F. Parity space-based optimal event-triggered fault detection[J]. IET Control Theory & Applications, 2021, 15(5): 737-748.
- [20] Wu J S, Wu M F, Wang S F, et al. Event-triggered diagnostic observer design using the performance tradeoff approach[J]. IEEE Access, 2022, 10: 17484-17494.
- [21] 邱爱兵, 文成林, 姜斌. 采样数据系统最优诊断观测器设计[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(8): 979-984. (Qiu A B, Wen C L, Jiang B. Optimal diagnostic observer for sampled-data systems[J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(8): 979-984.)
- [22] Yan H C, Zhang H, Zhan X S, et al. Event-based H_∞ fault detection for buck converter with multiplicative noises over network[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2019, 66(6): 2361-2370.
- [23] Su X J, Xia F Q, Wu L G, et al. Event-triggered fault detector and controller coordinated design of fuzzy systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(4): 2004-2016.
- [24] Ning Z K, Yu J Y, Pan Y N, et al. Adaptive event-triggered fault detection for fuzzy stochastic systems with missing measurements[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(4): 2201-2212.
- [25] Tang W T, Wang Z H, Shen Y. Fault detection and isolation for discrete-time descriptor systems based on H_-/L_∞ observer and zonotopic residual evaluation[J]. International Journal of Control, 2020, 93(8): 1867-1878.
- [26] Wang Y. Robust fault detection and isolation based on zonotopic unknown input observers for discrete-time descriptor systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(10): 5293-5314.
- [27] Scott J K. Constrained zonotopes: A new tool for set-based estimation and fault detection[J]. Automatica, 2016, 69: 126-136.
- [28] Levine W, Athans M. On the optimal error regulation of a string of moving vehicles[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1966, 11(3): 355-361.

作者简介

吴劲松 (1998—), 男, 硕士生, 从事基于事件触发的故障诊断的研究, E-mail: ntuwujs@163.com;

邱爱兵 (1982—), 男, 教授, 博士, 从事智能建筑和智能电网的故障诊断与容错控制等研究, E-mail: aibqiu@ntu.edu.cn;

顾菊平 (1971—), 女, 教授, 博士, 从事电气检测、信号处理等研究, E-mail: gu.jp@ntu.edu.cn;

姜旭 (1997—), 男, 硕士生, 从事面向暖通空调系统的故障诊断的研究, E-mail: 3013745251@qq.com.