

基于事件触发的间歇传感器故障主动容错控制

范婷婷¹, 牟宗磊¹, 何童²

(1. 山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中央财经大学 统计与数学学院, 北京 102206)

摘要:提出一种基于事件触发的线性离散系统间歇传感器故障估计和主动容错控制方法。首先,利用一种新的表达方式来描述不同模式下的间歇传感器故障,并针对该故障在传感器输出端引入事件触发机制,通过获取的非均匀采样信息设计故障观测器,实现系统状态和传感器间歇故障的联合估计。然后,根据观测器的估计信息设计容错控制器,通过求解不同故障模式下误差增广系统的线性矩阵不等式,获得满足所有增广系统稳定性要求的公共解。本研究提出的含有事件触发的容错控制方法,可以通过触发机制在间歇故障频繁发生和消失的时段改变控制率调整的频率,减少控制率反复重构的次数并降低系统性能损耗的速度,有效改善控制效果,维护系统性能,减轻系统通讯压力。最后,在无人艇线性模型上进行仿真测试,验证本方法的有效性和优越性。

关键词:间歇故障;事件触发;主动容错控制;线性矩阵不等式;故障估计

中图分类号:TP273

文献标志码:A

Event-triggered active fault tolerant control for intermittent sensor faults

FAN Tingting¹, MOU Zonglei¹, HE Tong²

(1.College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao, Shandong 266590, China;

2.School of Statistics and Mathematics, Central University of Finance and Economics, Beijing 102206, China)

Abstract: In this study, an event-triggered fault estimation and active fault-tolerant control method was proposed for linear discrete-time systems with intermittent sensor faults. First, a novel expression was presented to describe the intermittent sensor faults in different modes, and an event triggering mechanism was introduced at the output side of the sensor. By designing a fault observer based on the obtained non-uniform sampling information, the joint estimation of system states and sensor faults was realized. Second, a fault-tolerant controller was designed based on the estimated information of the observer. By solving the linear matrix inequalities of the error augmented systems under different fault modes, the common solution that satisfies the stability requirements of all augmented systems was obtained. The proposed method can change the adjustment frequency of control strategy with the triggering mechanism during the occurrence and disappearance periods of intermittent faults, and reduce the frequency of controller reconfiguration and the speed of controller performance loss, thus effectively improving the control effect, maintaining system properties, and alleviating the pressure of system communications. Finally, the validity and superiority of the proposed method were verified by the simulation tests on the linear model of unmanned surface vehicle.

Key words: intermittent fault; event trigger; active fault-tolerant control; linear matrix inequality; fault estimation

收稿日期:2020-10-07

基金项目:国家自然科学基金项目(61822308);青岛市博士后应用研究项目

作者简介:范婷婷(1993—),女,安徽合肥人,硕士研究生,主要从事系统故障诊断与容错控制的研究。

牟宗磊(1985—),男,山东日照人,讲师,博士,从事信号采集及信号处理技术、状态监测与故障诊断技术的研究,本文通信作者。E-mail:mzl@sdust.edu.cn

安全性和可靠性是衡量现代工业系统性能指标的重要因素,近些年来随着现代工业系统安全生产要求不断提高,故障诊断与容错控制技术受到各界的广泛关注^[1-2]。故障类型不同,运用的故障诊断与容错控制方法也不尽相同。根据故障发生位置,可将系统故障分为执行器故障、传感器故障和元部件故障等。对于含有执行器或传感器故障的系统,可以通过增加辅助变量来构造观测器^[3],或将系统扩维后设计观测器^[4-5],在此基础上利用反步法或重构控制率来实现故障容错^[6-9]。根据故障的持续时间不同,系统故障又可分为永久故障、瞬时故障和间歇故障,其中间歇故障是工业系统中发生概率较高的一类,但是间歇故障容错控制方法的研究相对较少^[10]。文献[11]利用增广卡尔曼滤波器来同时估计线性离散随机系统状态和间歇故障;文献[12]运用等价空间方法将残差和扰动解耦,通过假设检验来提高间歇故障的检测精度;文献[13]利用双层卡尔曼滤波来联合估计系统状态、无故障约束状态和间歇故障的故障诊断等。但上述工作均未对发生故障的系统作进一步的控制设计,应针对间歇故障进行容错控制研究。

此外,工业过程大多采用周期性采样和传输技术来控制系统,这种数据采集和传递方式既增加通讯消耗又导致能量和计算资源的浪费,因此事件触发控制机制成为传统周期性采样技术的替代和补充^[14]。相关工作包括在模型预测控制的基础上添加事件触发机制,减少控制序列的更新次数,从而减轻网络传输负担,提高计算优越性^[15-17];在含有执行器故障情况下,通过事件触发机制来降低通讯频率,并重构控制率使系统满足一致最终有界^[18];针对含有外部扰动、参数不确定性和未知执行器故障的卫星姿态控制系统,通过事件触发机制来降低信息传输频率,减轻网络传输负担,并通过反步法来补偿故障和外部扰动带来的系统影响^[19]。但上述工作均未考虑传感器故障情况。

本研究以含有间歇传感器故障的线性系统为研究对象,通过事件触发主动容错控制技术优化系统的故障容错性能。主要创新点在于对含有不同间歇传感器故障模态的系统,通过求解多个线性矩阵不等式,使系统在不同故障模态下具有公共的观测器、控制器增益以及事件触发采样参数,降低了含有事件触发机制的容错控制设计难度,事件触发的容错控制策略可以针对间歇故障频繁发生和消失的特点,在故障发生和消失时增加控制率调整的频率,改善系统控制效果,并有效缓解系统网络通讯压力。

符号说明: \mathbf{R}^n 表示 n 维欧式范数, $\text{diag}(p_1, p_1, \dots, p_m)$ 表示对角矩阵, \mathbf{A}^T 表示矩阵 \mathbf{A} 的转置, \mathbf{A}^{-1} 表示矩阵 \mathbf{A} 的逆, \mathbf{I} 和 $\mathbf{0}$ 表示适当维度的单位矩阵和零矩阵。

1 问题描述

考虑如下含有间歇传感器故障的线性离散系统:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k), \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \sum_{i=1}^M \alpha_i(k) \mathbf{F}_i f(k). \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}(k) \in \mathbf{R}^n$, $\mathbf{u}(k) \in \mathbf{R}^q$ 和 $\mathbf{y}(k) \in \mathbf{R}^m$ 分别为系统状态、输入向量和输出向量; $f(k)$ 为传感器测量处发生的常值间歇故障; \mathbf{F}_i 为不同故障模态下的方向系数矩阵; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 为已知合适维度的参数矩阵; $i \in [1, 2, \dots, M]$ 为故障模态,共有 M 种类型的故障模态,对 α_i 给定以下假设:

假设 1 α_i 是只能取0或1的已知标量,且每个时刻最多只有 $\alpha_i = 1$,其余 $\alpha_j = 0 (j \neq i)$ 。

为减少通讯负担,在输出传感器端引入事件触发机制,事件触发的条件为:

$$\|\mathbf{y}(k^*) - \mathbf{y}(k)\| > \delta \|\mathbf{y}(k)\|, \quad (2)$$

式中, $\mathbf{y}(k)$ 是当前时刻的传感器测量值, $\mathbf{y}(k^*)$ 是上一次触发时刻的传输值, $\delta (0 < \delta < 1)$ 是待设计的事件触发采样参数。当式(2)成立时,将当前时刻的传感器测量值 $\mathbf{y}(k)$ 传递至观测器;当式(2)不成立时,则将上一次触发时刻输出值传递至观测器。

假设 2 传感器故障幅值有界且已知,即 $f(k) \leq \theta$ 。

2 主动容错控制

首先构造故障诊断观测器

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}u(k) + \mathbf{L}_1(\tilde{\mathbf{y}}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k)), \\ \hat{\mathbf{y}}(k) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(k) + \sum_{i=1}^M \alpha_i(k) \mathbf{F}_i \hat{f}(k), \\ \hat{f}(k+1) = \hat{f}(k) + \mathbf{L}_2(\tilde{\mathbf{y}}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k)). \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\hat{\mathbf{x}}(k)$ 、 $\hat{f}(k)$ 和 $\hat{\mathbf{y}}(k)$ 分别为系统状态、故障和输出的估计值, \mathbf{L}_1 和 \mathbf{L}_2 为待设计的观测器增益矩阵, $\tilde{\mathbf{y}}(k)$ 为当前时刻观测器收到的信号。同时为了实现故障容错, 设计状态反馈控制率

$$\mathbf{u}(k) = -\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}(k), \quad (4)$$

式中, \mathbf{K} 为待设计的控制率参数矩阵。

定义

$$\begin{cases} \mathbf{e}_x(k) = \mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k), \\ e_f(k) = f(k) - \hat{f}(k), \\ \tilde{\mathbf{e}}_y(k) = \tilde{\mathbf{y}}(k) - \mathbf{y}(k). \end{cases}$$

则根据式(1)和式(3)可以得到误差系统如下:

$$\begin{cases} \mathbf{e}_x(k+1) = (\mathbf{A} - \mathbf{L}_1\mathbf{C})\mathbf{e}_x(k) - \mathbf{L}_1 \sum_{i=1}^M \alpha_i(k) \mathbf{F}_i e_f(k) - \mathbf{L}_1 \tilde{\mathbf{e}}_y(k), \\ e_f(k+1) = (\mathbf{I} - \mathbf{L}_2 \sum_{i=1}^M \alpha_i(k) \mathbf{F}_i) e_f(k) - \mathbf{L}_2 \mathbf{C} \mathbf{e}_x(k) - \mathbf{L}_2 \tilde{\mathbf{e}}_y(k) + \Delta f(k). \end{cases} \quad (5)$$

考虑到间歇故障在每个故障间隔期间的幅值不变, 则只有在间歇故障发生和消失的瞬间, 间歇故障增量 $\Delta f(k) = f(k+1) - f(k)$ 不为零, 其余时间 $\Delta f(k)$ 均恒等于零。将控制率式(4)代入系统状态方程, 并将状态方程和误差系统式(5)合并, 扩展成增广系统:

$$\boldsymbol{\eta}(k+1) = \bar{\mathbf{A}}_i \boldsymbol{\eta}(k) + \bar{\mathbf{L}} \tilde{\mathbf{e}}_y(k). \quad (6)$$

$$\text{式中, } \boldsymbol{\eta}(k) = [\mathbf{x}(k) \quad \mathbf{e}_x(k) \quad e_f(k)]^T, \bar{\mathbf{A}}_i = \mathbf{A}_1 + \bar{\mathbf{K}}\mathbf{X} + \bar{\mathbf{L}}\mathbf{Y}_i, \bar{\mathbf{L}} = [\mathbf{0} \quad -\mathbf{L}_1^T \quad -\mathbf{L}_2^T]^T, \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix},$$

$$\bar{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \mathbf{BK} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} -\mathbf{I} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}^T, \mathbf{Y}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{C}^T \\ \sum_{i=1}^M \alpha_i(k) \mathbf{F}_i^T \end{bmatrix}^T.$$

3 稳定性证明

定理 1 如果存在对称矩阵 $\mathbf{P} > \mathbf{0}$, 矩阵 \mathbf{N}_1 、 \mathbf{N}_2 和标量 $\beta > 0$ 满足以下矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P} & \mathbf{P}\mathbf{A}_1 + \mathbf{N}_1\mathbf{X} + \mathbf{N}_2\mathbf{Y}_i & \mathbf{N}_2 \\ * & \text{diag}(\beta\mathbf{C}^T\mathbf{C}, 0, 0) - \mathbf{P} & \mathbf{0} \\ * & * & -\mathbf{I} \end{bmatrix} < \mathbf{0}. \quad (7)$$

则系统的状态以及状态和故障的估计误差在没有间歇故障时渐近收敛, 在发生间歇故障时一致最终有界。

在此基础上, 增广系统中的事件触发采样参数、故障估计器增益和控制器增益矩阵分别为: $\delta = \sqrt{\beta/(\beta+1)}$, $\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{N}_1$, $\bar{\mathbf{L}} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{N}_2$ 。

证明: 设计李雅普诺夫函数

$$V(k) = \boldsymbol{\eta}^T(k) \mathbf{P} \boldsymbol{\eta}(k), \quad (8)$$

则

$$\Delta V(k) = \boldsymbol{\eta}^T(k) (\bar{\mathbf{A}}_i^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{A}}_i - \mathbf{P}) \boldsymbol{\eta}(k) + \tilde{\mathbf{e}}_y^T(k) \bar{\mathbf{L}}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{L}} \tilde{\mathbf{e}}_y(k) + 2\boldsymbol{\eta}^T(k) \bar{\mathbf{A}}_i^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{L}} \tilde{\mathbf{e}}_y(k), \quad (9)$$

将状态方程代入式(2)并结合范数不等式得:

$$\delta^2(\mathbf{x}^T(k)\mathbf{C}^T\mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \sum_{i=1}^M \alpha_i(k)\mathbf{F}_i^T\mathbf{F}_i f^2(k) + 2\sum_{i=1}^M \alpha_i(k)\mathbf{x}^T(k)\mathbf{C}^T\mathbf{F}_i f(k)) - \tilde{\mathbf{e}}_y^T(k)\tilde{\mathbf{e}}_y(k) > 0. \quad (10)$$

又因为

$$2\sum_{i=1}^M \alpha_i(k)\mathbf{x}^T(k)\mathbf{C}^T\mathbf{F}_i f(k) \leq \frac{\delta^2}{1-\delta^2}\mathbf{x}^T(k)\mathbf{C}^T\mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \frac{1-\delta^2}{\delta^2}\sum_{i=1}^M \alpha_i(k)\mathbf{F}_i^T\mathbf{F}_i f^2(k), \quad (11)$$

定义 $\beta = \frac{\delta^2}{1-\delta^2} > 0$, 那么式(11)可以写成:

$$\beta\mathbf{x}^T(k)\mathbf{C}^T\mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \sum_{i=1}^M \alpha_i(k)\mathbf{F}_i^T\mathbf{F}_i f^2(k) > 0. \quad (12)$$

将式(12)代入式(9), 并根据假设2可将式(9)写成:

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &\leq \boldsymbol{\eta}^T(k)(\bar{\mathbf{A}}_i^T\mathbf{P}\bar{\mathbf{A}}_i - \mathbf{P} + \text{diag}(\beta\mathbf{C}^T\mathbf{C}, 0, 0))\boldsymbol{\eta}(k) + \\ &2\boldsymbol{\eta}^T(k)\bar{\mathbf{A}}_i^T\mathbf{P}\bar{\mathbf{L}}\tilde{\mathbf{e}}_y(k) + \tilde{\mathbf{e}}_y^T(k)(\bar{\mathbf{L}}^T\mathbf{P}\bar{\mathbf{B}} - \mathbf{I})\tilde{\mathbf{e}}_y(k) + \sum_{i=1}^M \alpha_i(k)\mathbf{F}_i^T\mathbf{F}_i\theta^2, \end{aligned} \quad (13)$$

即

$$\Delta V(k) \leq [\boldsymbol{\eta}^T(k) \quad \tilde{\mathbf{e}}_y^T(k)]^T \boldsymbol{\Phi}_i [\boldsymbol{\eta}^T(k) \quad \tilde{\mathbf{e}}_y^T(k)] + \sum_{i=1}^M \alpha_i(k)\mathbf{F}_i^T\mathbf{F}_i\theta^2, \quad (14)$$

其中,

$$\boldsymbol{\Phi}_i = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}}_i^T\mathbf{P}\bar{\mathbf{A}}_i - \mathbf{P} + \text{diag}(\beta\mathbf{C}^T\mathbf{C}, 0, 0) & \bar{\mathbf{A}}_i^T\mathbf{P}\bar{\mathbf{L}} \\ \bar{\mathbf{L}}^T\mathbf{P}\bar{\mathbf{A}}_i & \bar{\mathbf{L}}^T\mathbf{P}\bar{\mathbf{L}} - \mathbf{I} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

如果 $\boldsymbol{\Phi}_i < \mathbf{0}$, 通过求解 M 种线性矩阵不等式能够得到公共解 \mathbf{P} , 则可以证明增广系统在无故障时渐近稳定, 在发生间歇故障时一致最终有界。式(15)等价于:

$$[\bar{\mathbf{A}}_i^T \quad \bar{\mathbf{L}}^T]^T \mathbf{P} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{P} [\bar{\mathbf{A}}_i \quad \bar{\mathbf{L}}] + \begin{bmatrix} \text{diag}(\beta\mathbf{C}^T\mathbf{C}, 0, 0) - \mathbf{P} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{I} \end{bmatrix} < \mathbf{0}. \quad (16)$$

式(16)由 Schur 补^[20]可得:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P} & \mathbf{P}\bar{\mathbf{A}}_i + \mathbf{N}_1\mathbf{X} + \mathbf{N}_2\mathbf{Y}_i & \mathbf{N}_2 \\ * & \text{diag}(\beta\mathbf{C}^T\mathbf{C}, 0, 0) - \mathbf{P} & \mathbf{0} \\ * & * & -\mathbf{I} \end{bmatrix} < \mathbf{0}, \quad (17)$$

最终可解得 $\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{N}_1$, $\bar{\mathbf{L}} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{N}_2$ 。

4 仿真实验

利用无人艇线性系统来验证上述理论推导的有效性, 采样时间 $T=0.2$ s, 仿真时间 40 s, 给定系统各参数矩阵如下^[21]:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 \\ -0.0014 & -0.0025 & 6.7127 \times 10^{-5} & -0.8670 & -0.0267 & -0.0026 \\ -0.0035 & -0.0038 & 7.9096 \times 10^{-6} & -0.0025 & -0.0518 & -0.0026 \\ 0.1613 & 0.2739 & -0.0056 & 0.5194 & 0.5455 & -0.5504 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.2038 & 0.4205 & 263.0867 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0461 & -0.2739 & -259.3003 \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

仿真中, 把不同幅值的间歇传感器故障归为同一模态类型, 没有发生任何故障的正常系统状态看作另一种模态类型, 即假设仿真中仅有发生传感器故障和未发生故障两种模态类型, 给出两种模态下的方向矩阵分

别为: $\mathbf{F}_1 = [1.3 \quad -2.5]^\top$, $\mathbf{F}_2 = [1 \quad 1]^\top$ 。故障发生和消失的间隔以及不同时刻的故障幅值描述如式(18)所示。

$$f(k) = \begin{cases} 0.5, & 4 \text{ s} < t < 8 \text{ s}, 24 \text{ s} < t < 28 \text{ s}; \\ -0.5, & 14 \text{ s} < t < 18 \text{ s}, 34 \text{ s} < t < 38 \text{ s}; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (18)$$

通过仿真平台 LMI 工具箱求得的事件触发采样参数为 $\delta = 0.506$, 各增益矩阵为:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -0.0015 & -0.0027 & 6.2181 \times 10^{-5} & -0.0387 & -0.0163 & 0.0032 \\ -0.0020 & -0.0035 & 7.7351 \times 10^{-5} & -0.0406 & -0.0180 & 0.0047 \end{bmatrix}, \mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} 0.3793 \\ -0.0631 \end{bmatrix}^\top, \\ \mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} 6.1150 \times 10^{-19} & -6.5042 \times 10^{-19} & 2.1122 \times 10^{-18} & -3.7611 \times 10^{-4} & -8.4128 \times 10^{-4} & 0.0426 \\ -1.0760 \times 10^{-18} & -3.1283 \times 10^{-18} & 2.1404 \times 10^{-18} & -3.2342 \times 10^{-4} & -5.5343 \times 10^{-4} & 0.0360 \end{bmatrix}^\top。$$

仿真结果如图 1、图 2 所示,其中图 1 是真实故障幅值与观测器的故障估计值,图 2 是故障的估计误差。

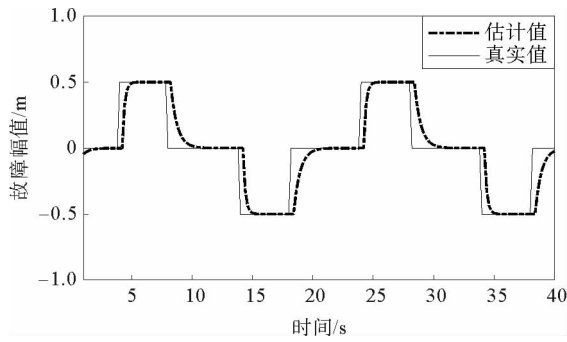


图 1 传感器故障与故障估计

Fig. 1 The estimation of sensor fault

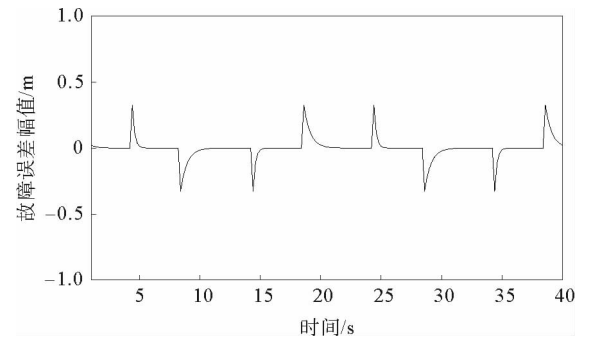


图 2 真实故障与估计误差

Fig. 2 The error of fault estimation

对比图 1、图 2 可以看出,估计值在故障幅值发生改变的短时间内误差较大,但依然能够快速跟上,因此本研究设计的观测器有良好的估计效果。

图 3、图 4 分别是加入设计的控制率后的系统状态及系统状态误差。

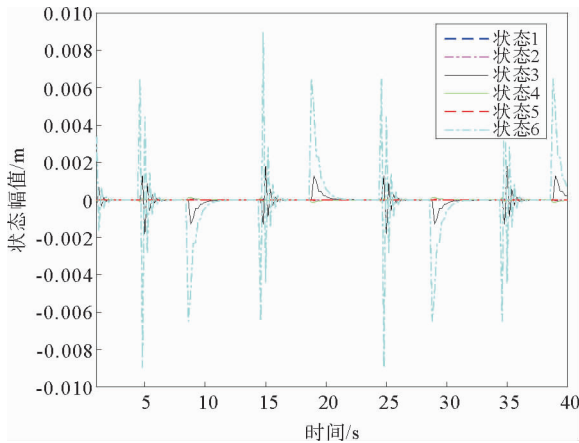


图 3 容错控制状态

Fig. 3 The system states with FTC

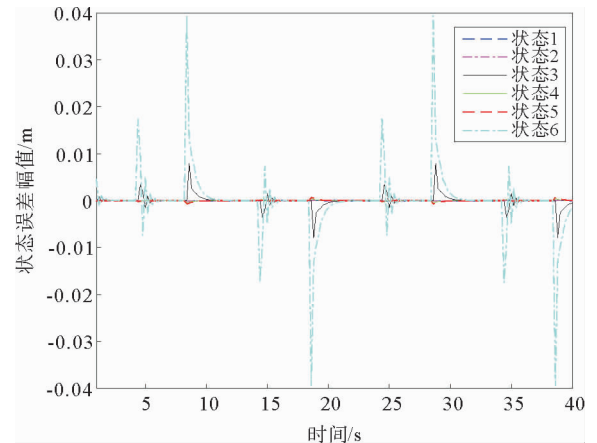


图 4 真实状态与估计误差

Fig. 4 The error of states estimation

分析图3、图4可以看出,系统稳定之后,状态只在每次间歇故障发生和消失的瞬间即系统模态发生改变的瞬间有所波动,在无故障和故障间隔内,状态都能够很好地稳定在零点。

由图5分析可知:系统开始工作的0~4 s内,振荡较大,触发次数较多;4~8 s内发生故障,触发次数依然较多;8~14 s、18~24 s、28~34 s以及38~40 s内系统稳定且没有故障发生,触发次数明显减少;14~18 s、24~28 s、34~38 s内发生故障,触发次数相对较多。可以看出,加入事件触发机制后系统信息的传输频率明显减少,网络的通讯压力有效降低。

综上,本控制方法对故障有更加快速和优越的镇定效果,且加入的事件触发机制有效缓解了系统网络的通讯压力。

5 结论

本研究提出一种基于事件触发线性离散系统间歇传感器故障的估计和主动容错控制方法。通过将状态、状态及故障估计误差进行扩维,利用线性矩阵不等式同时解得公共且合适的观测器、控制器增益以及事件触发采样参数,使得系统在发生不同模态的间歇故障时,灵活改变控制率重构频率,减少控制器反复调整的次数,缓解控制器性能损耗速度,有效降低了传感器到观测器的传输频率,减轻了通讯压力。仿真实例也证明该方法在估计和控制性能上的效果。下一步将对故障特性和处理方法做更合理和宽泛的优化,并在此基础上考虑非线性系统的间歇故障诊断与容错控制问题,研究加入多个触发机制的事件触发控制问题。

参考文献:

- [1]周东华,刘洋,何潇.闭环系统故障诊断技术综述[J].自动化学报,2013,39(11):1933-1943.
ZHOU Donghua,LIU Yang,HE Xiao.Review on fault diagnosis techniques for closed loop systems[J].Acta Automatica Sinica,2013,39(11):1933-1943.
- [2]周东华,DING X.容错控制理论及其应用[J].自动化学报,2000,26(6):788-797.
ZHOU Donghua,DING X.Theory and applications of fault tolerant control[J].Acta Automatica Sinica,2000,26(6):788-797.
- [3]ZHU J W,YANG G H,WANG H,et al.Fault estimation for a class of nonlinear systems based on intermediate estimator[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2016,61(9):2518-2524.
- [4]PAZERA M,WITCZAK M,AUBRUN C.Simultaneous estimation of multiple sensor and process faults for non-linear discrete time systems[J].IFAC-Papers OnLine,2018,51(24):82-87.
- [5]LIANG X H,WANG Q,HU C H,et al.Observer-based H_∞ fault-tolerant attitude control for satellite with actuator and sensor faults[J/OL].Aerospace Science and Technology,2019,95(5):105424-105433.DOI:10.1016/J.ast.2019.105424.
- [6]LIU X H,HAN J,ZHANG H F,et al.Adaptive fault estimation and fault-tolerant control for nonlinear system with unknown nonlinear dynamic[J/OL].IEEE Access,2019,7:136710-136728.DOI:10.1109/ACCESS.2019.2942387.
- [7]SHEN Q,YUE C F,GOH C H,et al.Active fault-tolerant control system design for spacecraft attitude maneuvers with actuator saturation and faults[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2019,66(5):3763-3772.
- [8]XIAO L F,MENG Z X,HUANG X H,et al.Adaptive observer based fault tolerant control for aircraft engine with sensors and actuators faults[C]//Chinese Control Conference.Guangzhou,IEEE,2019:4885-4889.
- [9]LIU Y,YANG G H.Integrated design of fault estimation and fault-tolerant control for linear multi-agent systems using relative outputs[J].Neurocomputing,2018,329:468-475.
- [10]周东华,史建涛,何潇.动态系统间歇故障诊断技术综述[J].自动化学报,2014,40(2):161-171.
ZHOU Donghua,SHI Jiantao,HE Xiao.Review of intermittent fault diagnosis techniques for dynamic systems[J].Acta

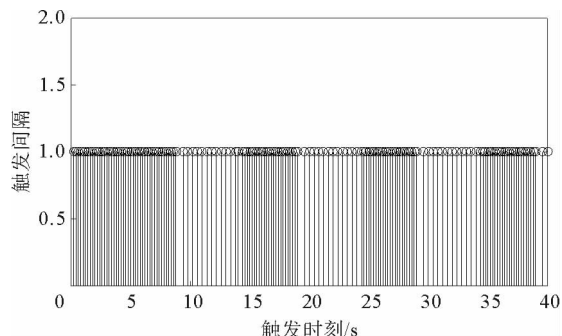


图5 事件触发采样图

Fig. 5 The event-triggered sampling

- Automatica Sinica, 2014, 40(2):161-171.
- [11] QIU A B, SHENG S K, ZHANG J. Optimal intermittent fault diagnosis for discrete-time systems[C]// Chinese Control Conference. Chengdu, IEEE, 2016:6814-6819.
- [12] YAN R Y, HE X, ZHOU D H. Detecting intermittent sensor faults for linear stochastic systems subject to unknown disturbance[J]. Journal of the Franklin Institute, 2016, 353(17):4734-4753.
- [13] 沈世焜, 邱爱兵, 邱卫东, 等. 基于双层 Kalman 滤波的间歇故障故障诊断与容错控制[J]. 控制工程, 2019, 26(11):1978-1985.
- SHEN Shikun, QIU Aibing, QIU Weidong, et al. Intermittent fault diagnosis and fault tolerant control based on two-layer Kalman filter[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(11):1978-1985.
- [14] 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 Aibing, HU Xian, QIU Weidong, et al. An integrated design of event-triggered fault diagnosis and dynamic fault accommodation[J]. Control Theory and Applications, 2018, 35(8):1159-1166.
- [15] YOO J Y, JOHANSSON K H. Event-triggered model predictive control with a statistical learning[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 51(4):2571-2581.
- [16] 钟麦英, 刘浩, 朱晓强, 等. 基于事件触发机制的故障诊断技术研究综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(2):95-102.
- ZHONG Maiying, LIU Hao, ZHU Xiaoqiang, et al. A survey on recent studies of event-triggered fault diagnosis technology [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021, 40(2):95-102.
- [17] 陆玲, 牛玉刚, 邹媛媛. 基于事件触发的鲁棒预测控制器设计[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2015, 41(4):515-522.
- LU Ling, NIU Yugang, ZOU Yuanyuan. Design of robust model predictive controller based on event trigger strategies[J]. Journal of East China University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2015, 41(4):515-522.
- [18] ZHANG C X, WANG J H, ZHANG D X, et al. Learning observer based and event-triggered control to spacecraft against actuator fault[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 78(7):522-530.
- [19] WANG C L, GUO L, HU Q L, et al. Event-triggered adaptive attitude tracking control for spacecraft with unknown actuator faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(3):2241-2250.
- [20] JBILOU K, MESSAOUDI A, TABAA K. Some Schur complement identities and applications to matrix extrapolation methods[J]. Linear Algebra and its Applications, 2004, 392(1):195-210.
- [21] LIN X S, WANG Y Q, CUI M L. Comparison of three data-driven identification methods and experimental testing on a Yunzhou unmanned surface vehicle[C]// Data Driven Control and Learning Systems Conference, 2020:1131-1135.

(责任编辑:傅 游)