DOI: 10.7641/CTA.2018.70733

基于事件触发的故障诊断与动态调节集成设计

邱爱兵[1,2†], 胡　贤[1], 邱卫东[2], 季胜蓝[2]

(1. 南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226019; 2. 江苏东源电器集团股份有限公司, 江苏 南通 226341)

摘要: 本文发展了一种事件触发采样与更新检测机制、故障诊断及调节的集成设计框架. 事件触发技术不仅用于传感器端, 同时也用于容错控制器端. 所设计的故障诊断观测器能够应用基于事件触发的非均匀采样输出同时估计故障和系统状态, 基于所获得的状态和估计信息, 构造事件触发更新检测器和动态容错控制器, 进而借助于增广系统方法来集成设计两个事件触发检测器、故障诊断观测器和容错控制器, 以保证故障系统的性能, 同时尽可能的降低传感器、控制器、执行器三者之间的信息传输频率. 仿真实例验证了所提方法的可行性和优越性.

关键词: 故障调节; 事件触发; 故障估计; 集成设计

引用格式: 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. 控制理论与应用, 2018, 35 (8): 1159 – 1166

中图分类号: TP273　　**文献标识码:** A

An integrated design of event-triggered fault diagnosis and dynamic fault accommodation

QIU Ai-bing[1,2†], HU Xian[1], QIU Wei-dong[2], JI Sheng-lan[2]

(1. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu 226019, China;
2. Jiangsu Dongyuan Electricity Group Company Limited, Nantong Jiangsu 226341, China)

Abstract: An integrated design framework of event-triggered sampling and updating mechanism, fault diagnosis and fault accommodation is developed in this paper. The event-triggered technique is applied to both sensor node and fault tolerant controller node. A fault diagnosis observer is firstly designed to estimate the fault and the state simultaneously using the event-triggered nonuniform sampled output. Based on the obtained fault and state information, an event-triggered updating detector and a dynamic fault tolerant controller are then constructed. The augmented system approach is further employed to design the two detectors, the fault diagnosis observer and fault tolerant controller simultaneously, not only to guarantee the performance of the faulty system, but also to reduce the information transfer frequency among the sensor, controller and actuator. Simulation results are finally provided to illustrate the effectiveness and superiority of the proposed approach.

Key words: fault accommodation; event-triggered; fault estimation; integrated design

Citation: QIU Aibing, HU Xian, QIU Weidong, et al. An integrated design of event-triggered fault diagnosis and dynamic fault accommodation. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(8): 1159 – 1166

1 引言(Introduction)

鉴于安全性与可靠性在现代工程系统中的重要地位, 故障诊断与容错控制技术在过去半个世纪内得到了学术界和工业界的持续关注[1–2]. 特别的, 随着网络通信技术在工业过程中的普及, 大量信息的远距离传输降低了通信的可靠性, 进而影响系统性能并增加了故障发生的可能, 为此, 研究人员开展了以网络化系统为对象的故障诊断与容错控制研究, 主要针对数据延迟、无序和丢包等典型网络传输现象进行了相应故障诊断与容错控制设计, 取得了大量理论和应用成果[3–5].

进一步的, 工业过程常通过周期性地采样与传输信息来监控系统, 然而这种传统的周期采样技术不仅会增加通信消耗, 同时也会导致计算和能量资源的浪费. 在此背景下, 事件触发技术被提出作为周期采样的替代和补充, 所谓的事件触发是指传感或通信设备

收稿日期: 2017−10−11; 录用日期: 2018−03−07.
†通信作者. E-mail: aibqiu@ntu.edu.cn; Tel.: +86 513-85012601.
本文责任编委: 周东华.
国家自然科学基金项目(61473159, 61374136, 61104028), 南通市应用研究项目(GY12016005)资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China (61473159, 61374136, 61104028) and the Nantong Application Research Project (GY12016005).

仅在满足某些预指定的条件时才进行信息采样或传输[6–7], 这种技术不仅可以降低计算复杂度和通信与能量消耗, 同时可以提高检测精度和控制性能[8], 因此成为了最近的研究热点. 不同的事件触发准则被相继提出应用于各类复杂系统的控制和状态估计, 并在四旋翼飞行器、智能车编队等对象上进行应用验证[9–10], 文献[7, 11]对此方面的研究进行了较全面和详尽的综述.

然而, 从故障诊断与容错控制角度来说, 事件触发技术由于其非均匀采样模式改变了系统性质[12–13], 损失了系统部分信息, 因而增加了故障诊断与容错控制的难度, 目前该方向的研究较少. 文献[14]针对send-on-delta采样系统提出了一种基于改进Kalman滤波器的故障检测方案. 文献[15]针对一类非线性网络控制系统, 发展了一种多项式事件触发采样机制下的故障检测滤波器设计方法, 其主要思想是通过将被控系统和故障检测滤波器进行增广, 然后将故障检测问题转化为滤波问题. 文献[16]在多目标优化问题框架下研究了离散时间系统的事件触发故障检测和隔离问题. 近期, 等价空间和区间观测器等方法被相继应用于事件触发故障检测[17–18]. 在容错控制方面, 文献[19]针对发生随机故障的网络控制系统, 发展了基于状态的事件触发容错控制器. 文献[20]研究了带有动态量化器的网络控制系统事件触发容错控制器, 文献[21]研究了非线性网络控制系统事件触发鲁棒保性能容错控制和通讯协议协同设计. 然而上述事件触发故障诊断研究仅局限于故障检测和隔离[14–18], 无法在线辨识和估计故障大小, 相应地已有事件触发容错控制也仅为被动容错[19–21], 未能实现更为高效的主动容错. 进一步的, 上述所有的事件触发故障诊断和容错控制研究中, 事件触发技术仅局限应用于传感器端, 其控制器到执行器端仍需要较高的通讯消耗.

针对上述问题, 本文将发展一种基于事件触发的故障诊断与故障调节集成设计方案. 故障调节在辨识和估计故障的基础上, 修正和补偿控制率, 使故障系统尽量保持无故障时的性能, 因此是最为有效的主动容错控制方法之一[2]. 论文主要贡献如下: 1) 所提方案不仅在传感器端使用了事件触发采样技术, 同时发展了基于状态估计的事件触发更新机制应用于控制端以降低控制器到执行机构的通讯消耗. 2) 借助于增广系统方法集成设计故障诊断观测器、动态容错控制器和事件触发采样和更新检测器, 在实现故障及时准确估计的基础上, 保障了系统在发生故障时的性能, 同时发展了一种迭代算法来尽可能的减少传感器、控制器和执行器3种之间的通讯消耗. 余下章节安排如下: 第2章构建了基于事件触发的故障诊断与容错控制系统框架并给出了问题描述, 第3章给出了观测器增益、动态容错控制器参数及事件触发参数的计算方法, 第4章通过仿真实例验证所提方案的有效性, 并比较了其它相关方法, 最后为总结与展望.

2 系统构建与问题描述(System description and problem formulation)

2.1 系统构建(System description)

图1给出了基于事件触发的故障诊断和主动容错控制系统框架. 传感器端和监控中心分别引入了事件触发采样和更新检测器, 以降低传感器至监控中心以及监控中心至执行器的通信消耗.

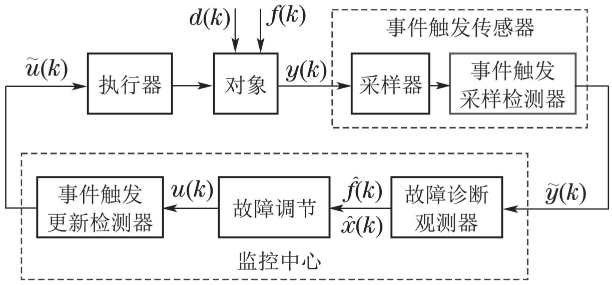


图 1 基于事件触发的故障诊断和主动容错控制系统框架

Fig. 1 A framework of event-triggered fault diagnosis and active fault tolerant control system

假定被控对象为如下离散时间线性时不变系统:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B\tilde{u}(k) + B_{\mathrm{f}}f(k) + B_{\mathrm{d}}d(k), \\ y(k) = Cx(k) + D_{\mathrm{d}}d(k), \end{cases} \tag{1}$$

其中: $x(k) \in \mathbb{R}^n$, $y(k) \in \mathbb{R}^m$, $d(k) \in \mathbb{R}^r$分别表示系统状态、输出和外部干扰; $f(k) \in \mathbb{R}^q$为待诊断的执行器或系统故障; $\tilde{u}(k) \in \mathbb{R}^p$为经过事件触发更新的控制输入; 参数矩阵$A, B, B_{\mathrm{f}}, B_{\mathrm{d}}, C, D_{\mathrm{d}}$为已知适维矩阵, 且$(A, B)$和$(A, C)$可镇定和可检测.

在传感器端, 事件触发采样检测器通过检验当前测量值$y(k)$与上一时刻传输值$y(t_k)$的相对误差是否小于预指定的阈值, 来确定是否传输当前测量值$y(k)$. 即当

$$\|y(t_k) - y(k)\| \leqslant \delta_1 \|y(k)\| \tag{2}$$

成立时, $y(k)$不传输, 其中$\delta_1 > 0$为待设计的事件触发采样参数. 而当式(2)不成立时, 则传输当前测量值$y(k)$. 通过保持器, 监控中心可接收到信号$\tilde{y}(k)$, 满足

$$\tilde{y}(k) = y(t_k),\ k = [t_k, t_k + 1, \cdots, t_{k+1}).$$

记系统输出传输误差$\tilde{e}_{\mathrm{y}}(k) = \tilde{y}(k) - y(k)$, 则有下式恒成立:

$$\|\tilde{e}_{\mathrm{y}}(k)\| \leqslant \delta_1 \|y(k)\|. \tag{3}$$

监控中心主要由故障诊断观测器、故障调节单元和事件触发更新检测器等构成. 为了监测系统状态并及时检测和诊断故障, 基于事件触发采样后的输出

$\tilde{y}(k)$, 构造如下故障诊断观测器:

$$\begin{cases}\hat{x}(k+1)=A\hat{x}(k)+B\tilde{u}(k)+B_{\mathrm{f}}\hat{f}(k)+\\ \qquad\qquad L[\tilde{y}(k)-\hat{y}(k)],\\ \hat{y}(k)=C\hat{x}(k),\\ \hat{f}(k+1)=\hat{f}(k)+\mathit{\Gamma}[\tilde{y}(k)-\hat{y}(k)],\end{cases}\tag{4}$$

其中: $\hat{x}(k),\hat{y}(k),\hat{f}(k)$分别表示$x(k),y(k),f(k)$的估计值, $L\in\mathbb{R}^{n\times m}$和$\mathit{\Gamma}\in\mathbb{R}^{q\times m}$为待设计的观测器增益矩阵. 进一步, 基于所获得状态和故障估计值$\hat{x}(k)$和$\hat{f}(k)$, 构造基于状态反馈的动态容错控制器来实现故障调节:

$$\begin{cases}x_{\mathrm{c}}(k+1)=A_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{c}}(k)+B_{\mathrm{c}}\hat{x}(k),\\ u(k)=C_{\mathrm{c}}x_{\mathrm{c}}(k)+D_{\mathrm{c}}\hat{x}(k)-B^{*}B_{\mathrm{f}}\hat{f}(k),\end{cases}\tag{5}$$

其中: $x_{\mathrm{c}}\in\mathbb{R}^{n}$表示控制器状态, $A_{\mathrm{c}},B_{\mathrm{c}}\in\mathbb{R}^{n\times n}$, C_{c}, $D_{\mathrm{c}}\in\mathbb{R}^{p\times n}$为待设计的控制器参数矩阵, 矩阵$B^{*}$满足等式$(I-BB^{*})B_{\mathrm{f}}=0$.

最后, 监控中心的事件触发更新检测器检验如下条件来确定是否更新控制输入:

$$\|u(r_k)-u(k)\|\leqslant\delta_2\,\|\hat{x}(k)\|\,,\tag{6}$$

其中: $u(r_k)$为上一时刻控制输入更新值, $\delta_2>0$表示待设计的事件触发更新参数. 当上式成立时, 控制输入不进行更新, 而式(6)不成立时, 则更新当前控制信号. 相应的, 借助于保持器, 执行器接收到的控制输入$\tilde{u}(k)$满足:

$\tilde{u}(k)=u(r_k),\ k=[r_k,r_k+1,\cdots,r_{k+1})$.

定义控制输入更新误差$\tilde{e}_{\mathrm{u}}(k)=\tilde{u}(k)-u(k)$, 则下式恒成立:

$$\|\tilde{e}_{\mathrm{u}}(k)\|\leqslant\delta_2\,\|\hat{x}(k)\|\,.\tag{7}$$

注 1　注意到事件触发更新检测器(6)并没有采取基于常规的控制输入相对误差来进行触发决策判断. 主要原因在于如果采取$\|u(r_k)-u(k)\|\leqslant\delta_2\,\|u(k)\|$这一常规事件触发机制, 则更新后的控制输入无法消除故障对系统的负面影响, 而容错控制器为基于状态反馈的控制器, 因此事件触发更新检测器选择基于状态估计值的判断准则.

注 2　故障诊断观测器(4)的输入除了事件触发采样输出$\tilde{y}(k)$, 还有事件触发更新输入$\tilde{u}(k)$. 由于故障诊断观测器和事件触发更新检测器集成在监控中心, 因此观测器可以获取控制更新输入$u(r_k)$及相应的$\tilde{u}(k)$.

2.2　问题描述(Problem formulation)

定义

$$e_{\mathrm{x}}(k)=x(k)-\hat{x}(k),$$
$$e_{\mathrm{f}}(k)=f(k)-\hat{f}(k),$$
$$e_{\mathrm{y}}(k)=y(k)-\hat{y}(k).$$

根据式(1)和式(4), 则有误差系统:

$$\begin{cases}e_{\mathrm{x}}(k+1)=(A-LC)e_{\mathrm{x}}(k)+(B_{\mathrm{d}}-LD_{\mathrm{d}})d(k)+\\ \qquad\qquad B_{\mathrm{f}}e_{\mathrm{f}}(k)-L\tilde{e}_{\mathrm{y}}(k),\\ e_{\mathrm{f}}(k+1)=e_{\mathrm{f}}(k)-\mathit{\Gamma}(Ce_{\mathrm{x}}(k)+D_{\mathrm{d}}d(k)+\\ \qquad\qquad \tilde{e}_{\mathrm{y}}(k))+\Delta f(k),\end{cases}\tag{8}$$

其中$\Delta f(k)=f(k+1)-f(k)$表示故障增量. 将动态容错控制器(5)代入到原系统(1), 并集成上述误差系统(8), 则有如下增广系统:

$$\eta(k+1)=A_{\eta}\eta(k)+B_{\omega}\omega(k)-L_{\mathrm{y}}\tilde{e}_{\mathrm{y}}(k)+B_{\mathrm{u}}\tilde{e}_{\mathrm{u}}(k),\tag{9}$$

其中:

$$\eta(k)=[\bar{x}^{\mathrm{T}}(k)\ \bar{e}^{\mathrm{T}}(k)]^{\mathrm{T}},\ \bar{x}(k)=[x^{\mathrm{T}}(k)\ x_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}(k)]^{\mathrm{T}},$$
$$\bar{e}(k)=[e_{\mathrm{x}}^{\mathrm{T}}(k)\ e_{\mathrm{f}}^{\mathrm{T}}(k)]^{\mathrm{T}},\ \omega(k)=[d^{\mathrm{T}}(k)\ \Delta f^{\mathrm{T}}(k)]^{\mathrm{T}},$$
$$A_{\eta}=\begin{bmatrix}\tilde{A}&\tilde{B}\\0&\bar{A}-\bar{L}\bar{C}\end{bmatrix},\ B_{\omega}=\begin{bmatrix}\bar{B}_{\mathrm{d}}&0\\\bar{B}_{\mathrm{d}}-\bar{L}D_{\mathrm{d}}&\bar{I}_1\end{bmatrix},$$
$$\tilde{A}=\begin{bmatrix}A+BD_{\mathrm{c}}&BC_{\mathrm{c}}\\B_{\mathrm{c}}&A_{\mathrm{c}}\end{bmatrix},\ \tilde{B}=\begin{bmatrix}BD_{\mathrm{c}}&-B_{\mathrm{f}}\\B_{\mathrm{c}}&0\end{bmatrix},$$
$$\bar{B}_{\mathrm{d}}=\begin{bmatrix}B_{\mathrm{d}}\\0\end{bmatrix},\ \bar{I}_1=\begin{bmatrix}0\\I\end{bmatrix},\ \bar{A}=\begin{bmatrix}A&B_{\mathrm{f}}\\0&I\end{bmatrix},\ L_{\mathrm{y}}=\begin{bmatrix}0\\\bar{L}\end{bmatrix},$$
$$\bar{L}=\begin{bmatrix}L\\\mathit{\Gamma}\end{bmatrix},\ \bar{C}=[C\ \ 0],\ B_{\mathrm{u}}=\begin{bmatrix}\bar{B}\\0\end{bmatrix},\ \bar{B}=\begin{bmatrix}B\\0\end{bmatrix}.$$

本文的设计目标为: 针对发生故障的被控对象(1), 设计故障诊断观测器增益$L,\mathit{\Gamma}$, 动态容错控制器参数$A_{\mathrm{c}},B_{\mathrm{c}},C_{\mathrm{c}},D_{\mathrm{c}}$以及事件触发采样和更新参数$\delta_1,\delta_2$, 使得故障系统和误差系统渐进稳定并满足$\mathrm{H}_{\infty}$性能指标$\|\eta(k)\|_2<\gamma\,\|\omega\|_2$, 同时尽可能多的降低传感器、监控中心以及执行器之间的通讯消耗.

注 3　在现有的各类连续或离散系统的故障估计和调节设计中, 观测器和控制器通常是分开进行设计的, 这简化了设计程序. 然而由于事件触发技术的引入, 分离原理不再成立, 为此本文通过增广观测器、容错控制器和被控对象来进行问题描述进而开展集成设计.

3　主要结论(Main results)

定理 1　对于给定标量$\gamma>0$, 如果存在矩阵$\hat{A}$, $\hat{B}\in\mathbb{R}^{n\times n}$, $\hat{C}$, $\hat{D}\in\mathbb{R}^{p\times n}$, $\bar{P}\in\mathbb{R}^{(n+q)\times m}$, 正定矩阵$X,Y\in\mathbb{R}^{n\times n}$, $P_2\in\mathbb{R}^{(n+q)\times(n+q)}$以及标量$\delta_1>0$, $\delta_2>0$满足如下矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix}-\mathit{\Phi}_1&\mathit{\Phi}_2&\mathit{\Phi}_3&-\mathit{\Phi}_4&\mathit{\Phi}_5&0&0\\ *&-\mathit{\Phi}_1&0&0&0&\mathit{\Phi}_6&\mathit{\Phi}_7\\ *&*&-\gamma I&0&0&\mathit{\Phi}_8&0\\ *&*&*&-I&0&0&0\\ *&*&*&*&-I&0&0\\ *&*&*&*&*&-\mathit{\Phi}_9&0\\ *&*&*&*&*&*&-\gamma I\end{bmatrix}<0,\tag{10}$$

其中:

$$\Phi_1=\begin{bmatrix} Y & I & 0\\ * & X & 0\\ * & * & P_2\end{bmatrix},\ \Phi_3=\begin{bmatrix} B_{\rm d} & 0\\ XB_{\rm d} & 0\\ P_2\bar{B}_{\rm d}-\bar{P}D_{\rm d} & P_2\bar{I}_1\end{bmatrix},$$

$$\Phi_2=\begin{bmatrix} AY+B\hat{C} & A+B\hat{D} & B\hat{D}\tilde{I}-\tilde{B}_{\rm f}\\ \hat{A} & XA+\hat{B} & \hat{B}\tilde{I}-X\tilde{B}_{\rm f}\\ 0 & 0 & P_2\bar{A}-\bar{P}\bar{C}\end{bmatrix},$$

$$\Phi_4=\begin{bmatrix} 0\\ 0\\ \bar{P}\end{bmatrix},\ \Phi_5=\begin{bmatrix} B\\ XB\\ 0\end{bmatrix},\ \tilde{B}_{\rm f}=[0\ B_{\rm f}],$$

$$\Phi_6=\begin{bmatrix} YC^{\rm T} & Y\\ C^{\rm T} & I\\ 0 & \bar{I}_2\end{bmatrix},\ \Phi_7=\begin{bmatrix} Y & Y & 0\\ I & 0 & 0\\ 0 & 0 & I\end{bmatrix},$$

$$\Phi_8=\begin{bmatrix} D_{\rm d}^{\rm T} & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix},\ \Phi_9={\rm diag}\{\delta_1^{-2},\delta_2^{-2}\},$$

$$\tilde{I}=[I\ 0],\ \bar{I}_1=\begin{bmatrix} 0\\ I\end{bmatrix},\ \bar{I}_2=\begin{bmatrix} I\\ 0\end{bmatrix},\ \bar{B}_{\rm d}=\begin{bmatrix} B_{\rm d}\\ 0\end{bmatrix}.$$

则系统状态及状态和故障估计误差$e_{\rm x}, e_{\rm f}$是渐进收敛的, 且满足$\rm H_\infty$性能指标$\|\eta(k)\|_2<\gamma\|\omega\|_2$. 相应地, 控制器参数和观测器增益分别为

$$\begin{aligned}&D_{\rm c}=\hat{D},\ C_{\rm c}=\hat{C}Y^{-1}-D_{\rm c},\\ &B_{\rm c}=(Y^{-1}-X)^{-1}(\hat{B}-XBD_{\rm c}),\\ &A_{\rm c}=(Y^{-1}-X)^{-1}(\hat{A}-X(A+BD_{\rm c}+\\ &\qquad BC_{\rm c})Y)Y^{-1}-B_{\rm c},\\ &\bar{L}=\begin{bmatrix} L\\ \varGamma\end{bmatrix}=P_2^{-1}\bar{P}.\end{aligned}$$

证 首先考虑系统渐进稳定性, 令$\omega(k)=0$, 定义如下Lyapunov函数$V(k)=\eta^{\rm T}(k)P\eta(k)$, 其中正定矩阵$P\in\mathbb{R}^{(3n+q)\times(3n+q)}$, 则基于增广系统(9)有

$$\begin{aligned}&\Delta V(k)=V(k+1)-V(k)=\\ &\eta^{\rm T}(k)(A_\eta^{\rm T}PA_\eta-P)\eta(k)-\\ &2\eta^{\rm T}(k)A_\eta^{\rm T}PL_{\rm y}\tilde{e}_{\rm y}(k)+2\eta^{\rm T}(k)A_\eta^{\rm T}PB_{\rm u}\tilde{e}_{\rm u}(k)+\\ &\tilde{e}_{\rm y}^{\rm T}(k)L_{\rm y}^{\rm T}PL_{\rm y}\tilde{e}_{\rm y}(k)-2\tilde{e}_{\rm y}^{\rm T}(k)L_{\rm y}^{\rm T}PB_{\rm u}\tilde{e}_{\rm u}(k)+\\ &\tilde{e}_{\rm u}^{\rm T}(k)B_{\rm u}^{\rm T}PB_{\rm u}\tilde{e}_{\rm u}(k).\end{aligned}\tag{11}$$

由于引入了事件触发机制, 根据式(3)和(6)并结合范数不等式有

$$\delta_1^2y^{\rm T}(k)y(k)-\tilde{e}_{\rm y}^{\rm T}(k)\tilde{e}_{\rm y}(k)>0,\tag{12}$$

$$\begin{aligned}&\delta_2^2x^{\rm T}(k)x(k)+2\delta_2^2x^{\rm T}(k)e_{\rm x}(k)+\delta_2^2e_{\rm x}^{\rm T}(k)e_{\rm x}(k)-\\ &\tilde{e}_{\rm u}^{\rm T}(k)\tilde{e}_{\rm u}(k)>0,\end{aligned}\tag{13}$$

将式(12)–(13)代入式(11)有

$$\begin{aligned}&\Delta V(k)\leqslant\\ &\eta^{\rm T}(k)(A_\eta^{\rm T}PA_\eta-P)\eta(k)-\\ &2\eta^{\rm T}(k)A_\eta^{\rm T}PL_{\rm y}\tilde{e}_{\rm y}(k)+2\eta^{\rm T}(k)A_\eta^{\rm T}PB_{\rm u}\tilde{e}_{\rm u}(k)+\\ &\tilde{e}_{\rm y}^{\rm T}(k)L_{\rm y}^{\rm T}PL_{\rm y}\tilde{e}_{\rm y}(k)-2\tilde{e}_{\rm y}^{\rm T}(k)L_{\rm y}^{\rm T}PB_{\rm u}\tilde{e}_{\rm u}(k)+\\ &\tilde{e}_{\rm u}^{\rm T}(k)B_{\rm u}^{\rm T}PB_{\rm u}\tilde{e}_{\rm u}(k)+\delta_1^2C^{\rm T}Cx^{\rm T}(k)x(k)-\\ &\tilde{e}_{\rm y}^{\rm T}(k)\tilde{e}_{\rm y}(k)+\delta_2^2x^{\rm T}(k)x(k)+2\delta_2^2x^{\rm T}(k)e_{\rm x}(k)+\\ &\delta_2^2e_{\rm x}^{\rm T}(k)e_{\rm x}(k)-\tilde{e}_{\rm u}^{\rm T}(k)\tilde{e}_{\rm u}(k)=\xi_1^{\rm T}(k)\varXi_1\xi_1(k),\end{aligned}$$

其中:

$$\xi_1(k)=[\eta^{\rm T}(k)\ \ \tilde{e}_{\rm y}^{\rm T}(k)\ \ \tilde{e}_{\rm u}^{\rm T}(k)]^{\rm T},$$

$$\varXi_1=\begin{bmatrix} A_\eta^{\rm T}PA_\eta+\varPi & -A_\eta^{\rm T}PL_{\rm y} & A_\eta^{\rm T}PB_{\rm u}\\ * & L_{\rm y}^{\rm T}PL_{\rm y}-I & -L_{\rm y}^{\rm T}PB_{\rm u}\\ * & * & B_{\rm u}^{\rm T}PB_{\rm u}-I\end{bmatrix},$$

这里:

$$\varPi={\rm diag}\left\{\delta_1^2C^{\rm T}C,0,0,0\right\}+\varDelta^{\rm T}\varDelta-P,$$
$$\varDelta=[\delta_2I\ \ 0\ \ \delta_2I\ \ 0].$$

如果$\varXi_1<0$, 则增广系统(9)渐进稳定, 即系统状态及状态和故障估计误差$e_{\rm x}, e_{\rm f}$是渐进稳定的. 又$\varXi_1<0$等价于

$$\begin{bmatrix} \varPi & 0 & 0\\ 0 & -I & 0\\ 0 & 0 & -I\end{bmatrix}+\begin{bmatrix} A_\eta^{\rm T}\\ -L_{\rm y}^{\rm T}\\ B_{\rm u}^{\rm T}\end{bmatrix}PP^{-1}P[A_\eta\ -L_{\rm y}\ \ B_{\rm u}]<0,\tag{14}$$

通过Schur补, 式(14)可以转换为

$$\begin{bmatrix} -P & PA_\eta & -PL_{\rm y} & PB_{\rm u}\\ * & \varPi & 0 & 0\\ * & * & -I & 0\\ * & * & * & -I\end{bmatrix}<0.\tag{15}$$

接下来证明$\rm H_\infty$性能$\|\eta(k)\|_2<\gamma\|\omega(k)\|_2$, 定义

$$J=\Delta V(k)+\frac{1}{\gamma}\eta^{\rm T}(k)\eta(k)-\gamma\omega^{\rm T}(k)\omega(k),$$

并借助于(12)–(13)有

$$\begin{aligned}J\leqslant&\ \eta^{\rm T}(k)A_\eta^{\rm T}PA_\eta\eta(k)+2\eta^{\rm T}(k)A_\eta^{\rm T}PB_\omega\omega(k)-\\ &2\eta^{\rm T}(k)A_\eta^{\rm T}PL_{\rm y}\tilde{e}_{\rm y}(k)+2\eta^{\rm T}(k)A_\eta^{\rm T}PB_{\rm u}\tilde{e}_{\rm u}(k)+\\ &\omega^{\rm T}(k)B_\omega^{\rm T}PB_\omega\omega(k)-2\omega^{\rm T}(k)B_\omega^{\rm T}PL_{\rm y}\tilde{e}_{\rm y}(k)+\\ &2\omega^{\rm T}(k)B_\omega^{\rm T}PB_{\rm u}\tilde{e}_{\rm u}(k)+\tilde{e}_{\rm y}^{\rm T}(k)L_{\rm y}^{\rm T}PL_{\rm y}\tilde{e}_{\rm y}(k)-\\ &2\tilde{e}_{\rm y}^{\rm T}(k)L_{\rm y}^{\rm T}PB_{\rm u}\tilde{e}_{\rm u}(k)+\tilde{e}_{\rm u}^{\rm T}(k)B_{\rm u}^{\rm T}PB_{\rm u}\tilde{e}_{\rm u}(k)-\\ &\eta^{\rm T}(k)P\eta(k)+\frac{1}{\gamma}\eta^{\rm T}(k)\eta(k)-\gamma\omega^{\rm T}(k)\omega(k)+\\ &\delta_1^2x^{\rm T}(k)C^{\rm T}Cx(k)+2\delta_1^2x^{\rm T}(k)C^{\rm T}D_{\rm d}d(k)+\\ &\delta_1^2d^{\rm T}(k)D_{\rm d}^{\rm T}D_{\rm d}d(k)-\tilde{e}_{\rm y}^{\rm T}(k)\tilde{e}_{\rm y}(k)+\\ &\delta_2^2x^{\rm T}(k)x(k)+2\delta_2^2x^{\rm T}(k)e_{\rm x}(k)+\end{aligned}$$

$$\delta_2^2 e_{\mathrm{x}}^{\mathrm{T}}(k)e_{\mathrm{x}}(k) - \tilde{e}_{\mathrm{u}}^{\mathrm{T}}(k)\tilde{e}_{\mathrm{u}}(k) =$$
$$\xi^{\mathrm{T}}(k)\Xi\xi(k),$$

其中:

$$\xi(k) = [\eta^{\mathrm{T}}(k)\ \ \omega^{\mathrm{T}}(k)\ \ \tilde{e}_{\mathrm{y}}^{\mathrm{T}}(k)\ \ \tilde{e}_{\mathrm{u}}^{\mathrm{T}}(k)]^{\mathrm{T}},$$

$$\Xi=\begin{bmatrix} A_\eta^{\mathrm{T}}PA_\eta+\Omega & \Psi_1 & -A_\eta^{\mathrm{T}}PL_{\mathrm{y}} & A_\eta^{\mathrm{T}}PB_{\mathrm{u}} \\ * & \Psi_2 & -B_\omega^{\mathrm{T}}PL_{\mathrm{y}} & B_\omega^{\mathrm{T}}PB_{\mathrm{u}} \\ * & * & L_{\mathrm{y}}^{\mathrm{T}}PL_{\mathrm{y}}-I & -L_{\mathrm{y}}^{\mathrm{T}}PB_{\mathrm{u}} \\ * & * & * & B_{\mathrm{u}}^{\mathrm{T}}PB_{\mathrm{u}}-I \end{bmatrix},$$

$$\Omega = \Pi + \frac{1}{\gamma}I,\ \Psi_1 = A_\eta^{\mathrm{T}}PB_\omega + \delta_1^2\bar{C}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\bar{D}_{\mathrm{d}},$$

$$\Psi_2 = B_\omega^{\mathrm{T}}PB_\omega + \delta_1^2\bar{D}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\bar{D}_{\mathrm{d}} - \gamma I,$$

$$\bar{C}_{\mathrm{d}} = [C\ 0\ 0\ 0],\ \bar{D}_{\mathrm{d}} = [D_{\mathrm{d}}\ 0].$$

令$\Xi<0$, 则有H_∞性能指标$\|\eta(k)\|_2 < \gamma\,\|\omega\|_2$成立. 进一步$\Xi<0$等价于

$$\begin{bmatrix} \Omega & Z_1 & 0 & 0 \\ * & Z_2 & 0 & 0 \\ * & * & -I & 0 \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} + Z_3^{\mathrm{T}}PP^{-1}PZ_3 < 0, \quad (16)$$

这里:

$$Z_1 = \delta_1^2\bar{C}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\bar{D}_{\mathrm{d}},\ Z_2 = \delta_1^2\bar{D}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\bar{D}_{\mathrm{d}} - \gamma I,$$

$$Z_3 = [A_\eta\ \ B_\omega\ \ -L_{\mathrm{y}}\ \ B_{\mathrm{u}}].$$

通过Schur补, 可以得到

$$\begin{bmatrix} -P & PA_\eta & PB_\omega & -PL_{\mathrm{y}} & PB_{\mathrm{u}} & 0 \\ * & \Pi & Z_1 & 0 & 0 & I \\ * & * & Z_2 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -I & 0 \\ * & * & * & * & * & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \ (17)$$

令$P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix}$, 且满足

$$P_1 = \begin{bmatrix} X & Y^{-1}-X \\ Y^{-1}-X & X-Y^{-1} \end{bmatrix},\ P_1^{-1} = \begin{bmatrix} Y & Y \\ Y & W \end{bmatrix},$$

这里$XY + (Y^{-1} - X)W = 0$.

定义

$$T = \begin{bmatrix} T_1 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix},\ T_1 = \begin{bmatrix} Y & I \\ Y & 0 \end{bmatrix}.$$

将式(15)左乘矩阵$\mathrm{diag}\,\{T^{\mathrm{T}},\ T^{\mathrm{T}},\ I,\ I,\ I,\ I\}$, 右乘它的转置, 并定义这里

$$\hat{A} = X(A+BD_{\mathrm{c}}+BC_{\mathrm{c}})Y +$$
$$(Y^{-1}-X)(B_{\mathrm{c}}+A_{\mathrm{c}})Y,$$
$$\hat{B} = XBD_{\mathrm{c}} + (Y^{-1}-X)B_{\mathrm{c}},$$
$$\hat{C} = (C_{\mathrm{c}}+D_{\mathrm{c}})Y,\ \hat{D} = D_{\mathrm{c}},\ \bar{P} = P_2\bar{L},$$

则式(10)得证, 定理1证毕.

定理1集成设计了故障诊断观测器增益L, Γ, 动态容错控制器参数$A_{\mathrm{c}}, B_{\mathrm{c}}, C_{\mathrm{c}}, D_{\mathrm{c}}$以及事件触发采样和更新参数$\delta_1, \delta_2$. 一般而言, 触发参数越大, 则对应的通讯消耗越少. 另外, 直观上, 传感器到控制器, 控制器到执行器两种网络之间必然存在一定的信息量权衡, 为此发展如下迭代算法来寻找最优的参数以尽可能同时减少传感器、控制器和执行器3种之间的通讯消耗.

算法 1 基于事件触发的故障诊断与动态调节集成设计算法.

Step 1 令$\delta_1=\delta_2=0$, 通过求解如下优化问题寻求最优的系统鲁棒控制性能下界γ^*:

$$\min\gamma,\ \ \text{s.t. 式}(10).$$

Step 2 给定预指定的系统性能$\gamma>\gamma^*$, 令$\delta_2=0$, 求解最大的事件触发采样参数$\delta_{1\max} = \sqrt{\dfrac{1}{\delta_{1\min}^{-2}}}$, 其中$\delta_{1\min}^{-2}$表示如下优化问题的最小解:

$$\min\delta_1^{-2}\ \ \text{s.t. 式}(10).$$

同理, 令$\delta_1=0$, 可得最大事件触发更新参数$\delta_{2\max}$.

Step 3 给定参数$i, j=0$, 令$\delta_1=\delta_{1\max}$, $\delta_2=\delta_{2\max}$, 选择

$$\Delta_1 = \frac{\delta_{1\max}}{N},\ \Delta_2 = \frac{\delta_{2\max}}{N},$$

其中N为足够大的整数, 同时不妨假设$\delta_{1\max}\geqslant\delta_{2\max}$.

Step 4 给定参数δ_2, 令$i=i+1$, $\delta_1=\delta_1-i\Delta_1$, 检测式(10)是否可行, 如果可行, 则停止(即求得相应的事件触发参数和观测器与控制参数), 如果不可行, 则继续迭代至$\delta_1<\delta_2$. 否则转至Step 5.

Step 5 令$\delta_2=\delta_2-i\Delta_2$, $\delta_1=\delta_{1\max}$, 转至Step 4.

注 4 在上述算法的Step 1中, 事件触发参数被要求为$\delta_1=\delta_2=0$, 此时事件触发系统退化为周期时间触发系统, (A,B)和(A,C)分别可镇定和可检测保证了式(10)的可行性, 进一步借助MATLAB 的LMI工具箱的mincx命令可获得最优解. 注意到, 在式(10)中, δ_1, δ_2以$\delta_1^{-2}, \delta_2^{-2}$这一非线性形式存在, 因此算法在Step 1的实际执行中, 令$\delta_1^{-2}, \delta_2^{-2}$分别取足够大的值, 来使$\delta_1$, δ_2趋近于0. 类似的, 在Step 3和Step 4中, 通过取$\delta_1^{-2}=\delta_{1\min}^{-2}, \delta_2^{-2}=\delta_{2\min}^{-2}$, 选择

$$\Delta_1 = \frac{\delta_{1\min}^{-2}}{N}, \Delta_2 = \frac{\delta_{2\min}^{-2}}{N},$$

此时迭代公式变为$i=i+1, \delta_{1,2}=\delta_{1,2}+i\Delta_{1,2}$, 按照变化后的迭代公式, 继续迭代至式(10)可行, 此时应满足$\delta_1^{-2}<\delta_2^{-2}$.

注 5 在算法Step 3中, 假设$\delta_{1\max}\geqslant\delta_{2\max}$, 如果$\delta_{2\max}\geqslant\delta_{1\max}$, 则Step 4与Step 5做对应调整即可.

4 仿真案例(Simulation example)

本节利用线性动态的直升机垂直起降系统来验证

所提方法的有效性. 令采样基周期$T = 0.1$ s, 相应的模型参数为[22]

$$A = \begin{bmatrix} -9.9477 & -0.7476 & 0.2632 & 5.0337 \\ 52.1659 & 2.7452 & 5.5532 & -24.4221 \\ 26.0922 & 2.6361 & -4.1975 & -19.2774 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.4422 & 0.1761 \\ 3.5446 & -7.5922 \\ 5.5200 & 4.4900 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\ B_{\rm d} = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \\ 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix}.$$

假设故障发生在第2个执行器通道, 那么

$$B_{\rm f} = [0.1761\ \ -7.5922\ \ 4.4900\ \ 0]^{\rm T}.$$

根据$(I - BB^{*})B_{\rm f} = 0$有

$$B^{*} = \begin{bmatrix} 0.0028 & -0.0115 & -0.0261 & -0.0015 \\ 1.3184 & -1.1595 & 0.4749 & 0.0269 \end{bmatrix}.$$

基于算法1的Step 1, 可获取H_∞最优鲁棒性能$\gamma^{*} = 20.55$; 根据Step 2, 指定$\gamma = 21 > \gamma^{*}$, 可求得最大的事件触发采样和更新参数分别为$\delta_{1\max} = 0.0724$和$\delta_{2\max} = 0.0587$, 在Step 3中, 设定$N = 100$, 进一步根据Step 4–5的迭代规则, 可获得最终的事件触发采样和更新参数分别为$\delta_1 = 0.0458$, $\delta_2 = 0.0450$, 相应的动态反馈容错控制器的参数矩阵和观测器增益为

$$A_{\rm c} = \begin{bmatrix} 0.1871 & 0.0206 & -0.0482 & 0.3035 \\ 0.0101 & 0.0032 & -0.0047 & 0.0653 \\ 0.0036 & -0.0491 & 0.0404 & -0.8821 \\ -0.0309 & 0.0451 & -0.0346 & 0.8001 \end{bmatrix},$$

$$B_{\rm c} = \begin{bmatrix} 0.0639 & -0.0278 & 0.0250 & 0.0088 \\ 0.0040 & 0.0009 & 0.0049 & 0.0098 \\ -0.0290 & 0.0166 & -0.0666 & -0.1166 \\ 0.0329 & -0.0158 & 0.0608 & 0.1102 \end{bmatrix},$$

$$C_{\rm c} = \begin{bmatrix} -5.1270 & -0.4364 & -0.7214 & 2.3418 \\ 3.4451 & 0.2591 & -0.4915 & -2.6943 \end{bmatrix},$$

$$D_{\rm c} = \begin{bmatrix} 0.7037 & -0.2329 & -0.2377 & -0.7686 \\ -1.3974 & 0.5418 & 0.2730 & 1.0946 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 0.2942 & -0.0470 & 0.4245 \\ 0.3447 & 1.2932 & -0.1063 \\ 0.5735 & 0.3355 & 0.7159 \\ 0.4769 & 0.0440 & 0.7789 \end{bmatrix},$$

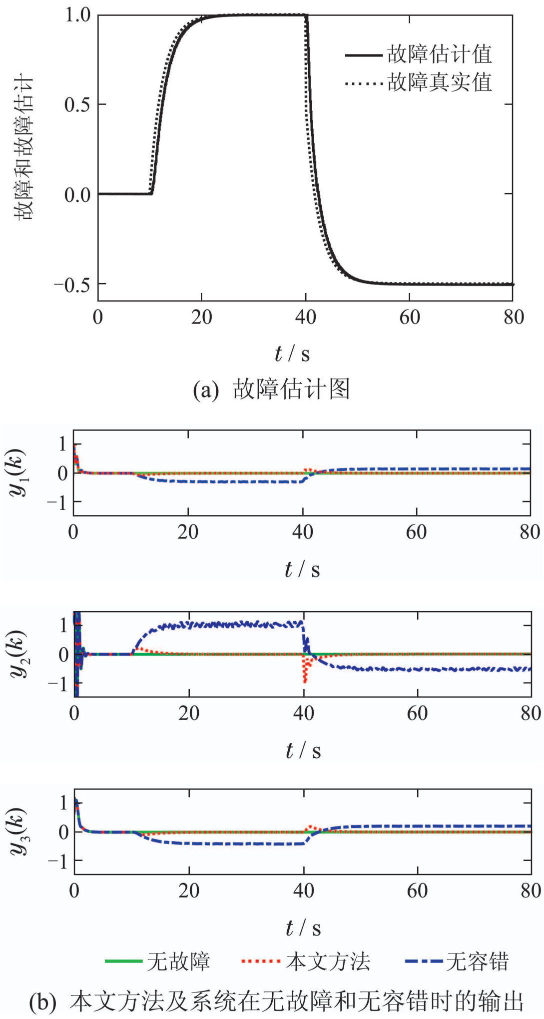
$$\varGamma = [-0.7967\ \ 0.0369\ \ -1.2327].$$

仿真中假设干扰信号$d(k) = 0.1\sin(0.01t)(0 \leqslant t \leqslant 80\ {\rm s})$, 故障信号为

$$f(k) = \begin{cases} 0, & t < 10\ {\rm s}, \\ 1 - {\rm e}^{-0.4(t-10)}, & 10\ {\rm s} \leqslant t \leqslant 40\ {\rm s}, \\ -0.5 + {\rm e}^{-0.4(t-40)}, & t > 40\ {\rm s}, \end{cases}$$

式中非负整数$k = 10t$.

图2给出了故障估计和系统输出图, 其中图2(a)为故障真实值及其估计图, 可以看出所提方案能够及时精确的检测和估计发生的故障, 图2(b)为系统基于本文方法、以及系统在无故障和无容错时的输出图, 可以看出, 当控制器无容错能力时, 系统输出偏离正常值, 而本文方法能够确保系统在发生故障时尽量保持无故障时的性能.



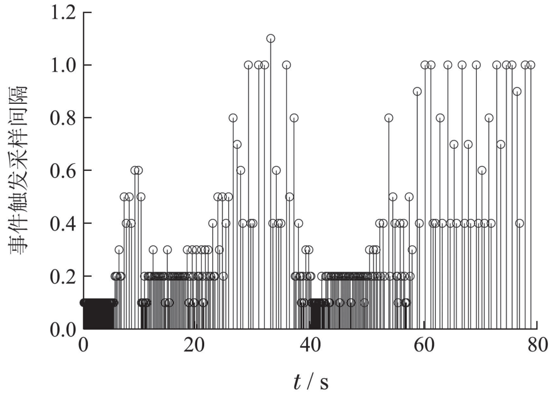
(a) 故障估计图

(b) 本文方法及系统在无故障和无容错时的输出

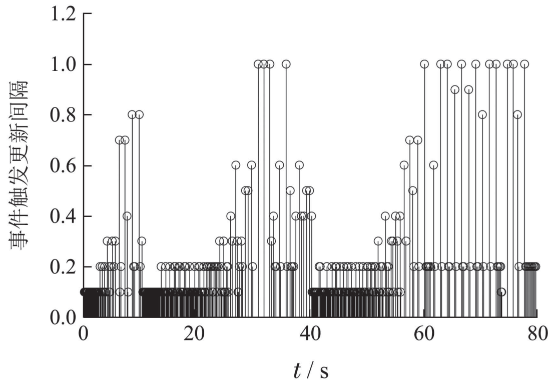
图 2 故障估计与系统输出图

Fig. 2 The results of fault estimation and system outputs

图3分别给出了传感器端和控制器端采样和更新间隔, 可以看出, 传感器、控制器和执行器3者之间的通信被显著降低. 进一步, 为了验证本文方法的优越性, 将本文所提方法与周期时间触发的故障诊断与调节方案(即$\delta_1 = \delta_2 = 0$), 以及与仅在传感器端使用事件触发技术的故障诊断与调节方案(即$\delta_2 = 0$, 此时$\delta_1 = \delta_{1\max}$), 进行比较.



(a) 传感器端的采样间隔



(b) 控制器端的更新间隔

图 3 事件触发采样和更新间隔图

Fig. 3 Event-triggered sampling and updating intervals

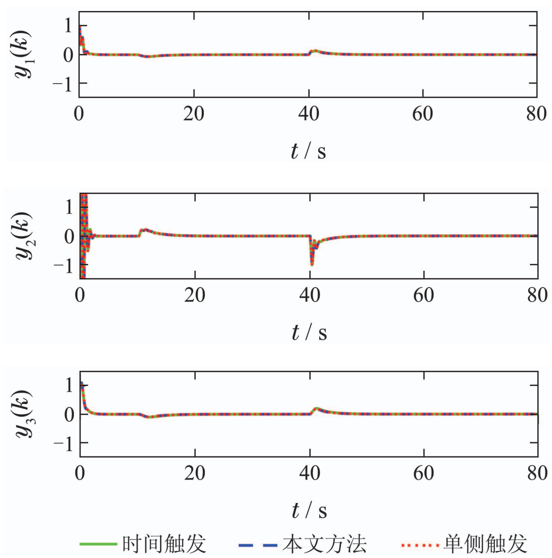


图 4 周期时间触发、单侧事件触发和本文方法3种方案的系统输出图

Fig. 4 System outputs of time-triggered, unilateral self-triggered and the proposed schemes

为了公平比较, 选择同样的$\gamma=21$, 图4给出了3种方案下的系统输出图, 可以看出于选取了同样的鲁棒性能指标, 容错效果几乎完全一致. 表1给出了3个容错控制方案的采样和控制更新数目, 以及相应的故障估计误差均方根(root mean square, RMS), 结合表1和图4, 可以看出相比于其他两种方法, 本文所提的事件触发方案能够在获得相似系统性能的前提下, 显著减少总的采样和更新次数.

表 1 时间触发、单侧事件触发与本文触发机制的对比

Table 1 Comparisons among time-triggered, unilateral self-triggered and the proposed schemes

	时间触发	本文事件触发	单侧事件触发
采样数目	800	298	251
更新数目	800	387	800
RMS	0.0666	0.0665	0.0665

5 结论(Conclusions)

本文发展了一种基于事件触发的故障诊断与主动容错控制集成设计方案. 考虑到现有常规的事件触发更新机制不适用于故障系统, 提出了基于状态估计的事件触发更新机制以降低控制端的信息传输频率. 所提算法不仅能够保障故障系统性能, 同时可以尽可能的降低传感器、动态容错控制器、执行器三者之间的通讯消耗. 事件触发技术使得诊断观测器和容错控制器不再满足分离原理, 本文应用增广系统方法进行集成设计, 然后这种集成设计由于高阶系统的引入, 在一定程度上使得分析计算较为复杂且具有一定保守性, 为了克服该问题, 接下来将进行事件触发机制下故障诊断观测器、容错控制器的分离设计研究. 同时本文所提方法可尝试在无人机、智能车等安全至上系统以及工业系统的远程监控等领域进行应用研究, 进一步的, 考虑事件触发技术与实际网络协议相结合也极具现实意义和理论挑战, 开展基于两者结合下的故障诊断与容错控制研究也是将来的努力方向之一.

参考文献(References):

[1] ZHOU Donghua, LIU Yang, HE Xiao. Review on fault diagnosis techniques for closed-loop systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(11): 1933 – 1943.
(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.)

[2] JIANG Bin, MAO Zehui, YANG Hao, et al. *Fault Diagnosis and Fault Accommodation for Control Systems* [M]. Beijing: Defense Industrial Press, 2009.
(姜斌, 冒泽慧, 杨浩, 等. 控制系统的故障诊断与故障调节 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.)

[3] ZHOU D H, WANG Z D, LIU G P, et al. Leakage fault diagnosis for an Internet-based three-tank systems: an experimental study [J]. *IEEE Transactions on Control system technology*, 2012, 20(4): 857 – 870.

[4] STEVEN D X, ZHANG P ,YIN S, et al. An integrated design framework of fault-tolerant wireless networked control systems for industrial automatic control applications [J]. *IEEE Transactions Industrial Informatics*, 2013, 9(1): 462 – 471.

[5] WANG Yanfeng, WANG Peiliang, CAI Zhiduan. Robust H_∞ fault detection for networked control systems with partly unknown time-delay transition probabilities [J]. *Control Theory & Applications*,

2017, 34(2): 273 – 279.
(王燕峰, 王培良, 蔡志端. 时延转移概率部分位置的网络控制系统鲁棒H_∞故障检测 [J]. 控制理论与应用, 2017 34(2): 273 – 279.)

[6] ADOLFO A, PAULO T. To sample or not to sample: self-triggered control for nolinear systems [J]. *IEEE Transactions Automatic Control*, 2009, 55(9): 2030 – 2042.

[7] HEEMELS W, JOHANSSON K, TABUADA P. An introduction to event-triggered and self-triggered control [C] //*Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control*. Maui, HI, USA: IEEE, 2012: 3270 – 3285.

[8] MENG X, CHEN T. Optimal sampling and performance comparison of periodic and event based impulse control [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(12): 3252 – 3259.

[9] GUERRERO C, JOSE F, DURAND S, et al. Attitude stabilization of a quadrotor by means of event-triggered nonlinear control [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014, 73(1): 123 – 135.

[10] DOLK V, PLOEG J, HEEMELS W H. Event-triggered control for string-stable vehicle platooning [J]. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(12): 3486 – 3500.

[11] 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): 1 – 15.

[12] QIU A B, JIANG B, WEN C L, et al. Fault estimation and accommodation for networked control systems with nonuniform sampling period [J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2015, 29(4): 427 – 442.

[13] 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.

[14] LI S, SAUTER D, XU B. Fault isolation filter for networked control system with event-triggered sampling scheme [J]. *Sensors*, 2011, 11(1): 557 – 572.

[15] LI H, CHEN Z, WU L, et al. Event-triggered fault detection of nonlinear networked systems [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(4): 1041 – 1052.

[16] HAJSHIRMOHAMADI S, DAVOODI M, MESKIN N, et al. Event-triggered fault detection and isolation for discrete-time linear systems [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 10(5): 526 – 533.

[17] PENG K, WANG M, DONG J. Event-triggered fault detection framework based on subspace identification method for the networked control systems [J]. *Neurocomputing*, 2017, 239: 257 – 267.

[18] ZHANG H, YANG G H. Event-triggered fault detection for a class of discrete-time linear systems using interval observers [J]. *ISA Transactions*, 2017, 68: 160 – 169.

[19] LIU J, YUE D. Event-triggering in networked systems with probabilistic sensor and actuator faults [J]. *Information Sciences*, 2013, 240(10): 145 – 160.

[20] DUAN K, ZHANG W. Event-triggered fault-tolerant control for networked systems with dynamic quantiser [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 10(9): 1088 – 1096.

[21] LI Wei, YAN Kun, LI Yajie. Co-design between robust H_∞ guaranteed cost fault tolerant and communication for NCS based on event-triggered [J]. *Journal of System simulation*, 2016, 28(5): 1140 – 1149.
(李炜, 阎坤, 李亚洁. 事件触发NCS鲁棒H_∞保性能容错与通讯协同设计 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28(5): 1140 – 1149.)

[22] ZHANG K, JIANG B, COCQUEMPOT V. Adaptive observer-based fast fault estimation [J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2008, 6(3): 320 – 326.

作者简介:

邱爱兵 (1982–), 男, 博士, 副教授, 目前研究方向为故障诊断、容错控制和数据融合, E-mail: aibqiu@ntu.edu.cn;

胡 贤 (1992–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为事件触发故障诊断与容错控制, E-mail: 136155258@qq.com;

邱卫东 (1958–), 男, 硕士, 高级工程师, 目前研究方向为光伏发电系统监测与控制, E-mail: qiuweidong@sina.com;

季胜蓝 (1988–), 女, 硕士, 中级工程师, 目前研究方向为光伏发电系统监测与控制, E-mail: ntjishenglan@163.com.