

基于动态事件触发的混沌系统故障容错同步问题

马大中^{1†}, 李晓瑜², 孙秋野¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 东北大学
材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110004)

摘要: 针对混沌系统故障容错同步问题进行研究, 设计基于动态事件触发的同步控制器以实现混沌系统的故障容错同步. 首先, 针对系统中存在的故障环节构造故障容错的系统模型, 在此基础上采用输入-状态稳定性(ISS)的方法, 将控制器求解问题转化为求解所对应故障容错系统的稳定性问题; 然后, 通过构造 Lyapunov 函数给出混沌系统故障容错同步的充分条件, 通过引入动态变量, 使得所设计的触发条件可以根据系统的运行状态进行动态调整, 在实现系统故障容错同步的同时, 最大程度地降低网络的占用率; 最后, 通过数值仿真验证所提出方法的有效性.

关键词: 故障容错; 混沌同步; 动态事件触发; 输入-状态稳定; 同步控制器; 动态变量

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Dynamic event-triggered fault tolerant synchronization of chaotic system

MA Da-zhong^{1†}, LI Xiao-yu², SUN Qiu-ye¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Key Lab of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The fault-tolerant chaotic system synchronization problem is studied in this paper. A synchronization controller based on dynamic event trigger is designed to realize the fault-tolerant chaotic system synchronization. First of all, for the fault existed in the system, the fault-tolerant system model is constructed. Based on the fault-tolerant system model designed, the input-state stability(ISS) method is used to transform the optimal sampling controller problem into the stability problem of the corresponding fault-tolerant system. The sufficient conditions for the fault-tolerant chaotic system synchronization are presented by constructing the Lyapunov functional. The triggering condition designed can modulate dynamically based on system operation condition by introducing dynamic variable, insuring fault-tolerant system synchronization, and the network usage rate is also heavily decreased. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by numerical simulations.

Keywords: fault-tolerant; chaos synchronization; dynamic event trigger; input-state stability; synchronization controller; dynamic variable

0 引言

自1990年Pecora和Carroll发现混沌系统可以被同步并且用电路实现了混沌系统同步之后, 混沌系统受到越来越多的研究人员关注. 由于混沌信号具有非周期性、连续宽带频谱、类噪声等特性, 使混沌同步的研究在保密通信^[1-2]、光学^[3]和人工神经网络^[4]等诸多领域都有广泛的应用. 人们提出了若干有效的同步控制方法, 如神经网络控制方法^[5]、自适应控制方法^[6-7]、反馈控制方法^[8]、滑模控制方法^[9]、函数

投影同步方法^[10-12]、Adomian分解控制方法^[13]等.

然而, 由于系统相互连接的问题、参数的漂移以及外界环境变化等原因, 会产生一些不可预知的故障. 而这些不可预知的故障会使传统的混沌同步控制器失效. 混沌容错同步控制可以在混沌同步系统出现故障时依然达到同步, 提高系统的鲁棒性和稳定性. 文献[14]针对两个未知混沌系统, 利用模糊滑模控制方法实现了故障容错的同步控制; 文献[15]设计了一种基于Lyapunov方程解耦拓扑结构的高增益观

收稿日期: 2018-02-01; 修回日期: 2018-06-29.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0108800); 国家自然科学基金项目(61773109, 61573094, 61627809); 教育部基础科研业务费专项资金项目(N160404005).

作者简介: 马大中(1982—), 男, 副教授, 博士, 从事故障诊断、容错控制、能源管理系统的研究; 孙秋野(1977—), 男, 教授, 博士, 从事网络控制、分布式控制、分布式优化分析等研究.

[†]通讯作者. E-mail: madazhong@ise.neu.edu.cn

测器协议和协作控制器的输出反馈控制器,解决了不相同的高阶多智能体系统的主动容错问题;文献[16]针对混沌系统发生的不同类型的故障,通过设计故障容错观测器实现了系统容错同步,所设计的容错同步方法无论混沌系统中是否有故障发生,都可以使混沌系统达到同步并且满足给定的性能指标。

上述方法在设计容错同步控制器时都是在周期触发的方式下进行控制信号更新。如果周期触发信号过长,则控制性能就会降低;如果周期触发信号过短,则控制信号频率更新过快,会占用过多的网络带宽,浪费资源。为了实现控制器的“按需”控制,研究人员提出了基于事件触发的控制器设计方法。该方法只有在系统状态满足触发条件时才进行数据的传送以及控制其信号的更新,可以实现按需传输。文献[17]通过将基于时间触发的控制器设计方法与基于事件触发的控制器设计方法进行对比,得出了基于事件触发方法所设计的控制器对于网络的需求明显降低的结论。文献[18]针对不同维度的主从混沌系统,设计了基于事件触发的数据传输规则,并给出了异构混沌系统同步的条件。与事件触发策略同时发展起来的还有自触发控制策略^[19-20]。

在混沌系统实现同步的初期,由于状态量差值较大,控制器需要不断更新控制信号,即事件触发器要被不断地触发,以实现快速的混沌同步。而在混沌系统实现同步的后期,由于混沌同步已基本实现,控制器不再需要快速地更新控制信号,而只有在同步的性能指标得不到满足时,才需要进行控制信号的更新。这种在不同时期有着不同需求的事件触发规则,是上述方法无法实现的。因此,文献[21]提出了基于动态事件触发的控制器设计方法,并通过理论证明了与静态的事件触发相比,动态事件触发在不同的控制时期可以采用不同的触发阈值,可以根据控制目标自动地调整触发规则。文献[22-23]通过设计分布式动态事件触发规则,实现了其一致性的控制目的。但是其所引入的动态变量都是随着时间而单调递减的,并不能实现对突发故障的快速响应。

综上所述,本文提出一种基于动态事件触发的混沌容错同步控制方法。该方法充分考虑突发故障对混沌同步系统的影响;在求解采样控制器的过程中,将混沌系统容错同步问题转化为误差系统的稳定性问题,并利用 Lyapunov 稳定性判据给出误差系统是渐近稳定的充分条件。最后,通过仿真实验验证了所提出的故障容错同步方法的有效性。

本文所设计的方法主要创新点如下:1) 针对带

有突发故障的混沌同步系统设计容错控制器,以实现混沌系统容错同步,提高混沌同步系统运行的可靠性;2) 通过引入动态变量,设计基于非单调动态事件触发规则的控制器信号更新方法,在满足控制性能指标的前提下,可以按需动态地传递控制信号并降低网络的带宽占用率;3) 所引入的动态变量,可以按需非单调地动态调整触发参数,增强系统的鲁棒性;4) 应用 Lyapunov 稳定性判据并结合输入-状态稳定 (ISS),给出基于非单调动态事件触发的混沌系统实现故障容错同步的条件。

1 问题描述

1.1 系统描述

考虑如下非线性系统:

$$\dot{x}(t) = h(x, u). \quad (1)$$

其中: $x \in R^n, u \in R^m$. 状态反馈控制器 $k \in R^n \rightarrow R^m$ 使系统(1)变为如下闭环系统:

$$\dot{x}(t) = h(x, k(x + e)), \quad (2)$$

其中 $e \in R^n$ 是测量误差。如果系统(2)存在一个输入-状态稳定 (ISS) 的 Lyapunov 函数,则称系统(2)是输入-状态稳定 (ISS) 的。为了分析系统(2)的输入-状态稳定性,给出如下的定义。

定义1 对于所有的状态 x 和测量误差 e ,如果存在一系列 k_∞ 函数 α_1 、 α_2 、 α_3 和 γ ,使连续函数 $V(x) : R^n \rightarrow R_0^+$ 满足如下不等式:

$$\alpha_1(\|x\|) \leq V(x(t)) \leq \alpha_2(\|x\|),$$

$$\nabla V(x)h(x, k(x + e)) \leq -\alpha_3(\|x\|) + \gamma(\|e\|), \quad (3)$$

则称 $V(x)$ 为 ISS 的 Lyapunov 函数。

基于系统(2),考虑如下带有故障的混沌同步系统:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_f f(t) + g(x(t)), \quad (4)$$

$$\dot{y}(t) = Ay(t) + g(y(t)) + u(t). \quad (5)$$

其中: $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T \in R^n, y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)]^T \in R^n$ 分别为主从混沌系统的状态向量; $g(x(t))$ 、 $g(y(t))$ 分别为主从混沌系统的非线性项; $u(t) \in R^m$ 为主从采样控制器; 矩阵 A 为已知的系数矩阵; $f(t) \in R^{n_1}$ 为系统所发生的未知故障; B_f 为常数矩阵。

故障 $f(t)$ 可通过如下系统的输出状态得到:

$$\dot{x}_f(t) = A_{wf}x_f(t) + B_{wf}f_0(t),$$

$$f(t) = C_{wf}x_f(t), x_f(0) = 0. \quad (6)$$

其中: $x_f(t) \in R^{n_f}$ 为故障系统的状态向量; A_{wf} 、 B_{wf} 和 C_{wf} 为故障系统的参数矩阵; $f_0(t) = \beta\delta(t -$

t_f), $\delta(t)$ 为脉冲函数, t_f 为故障发生的时刻, β 为决定故障大小的参数. 系统(6)可以用来描述多种类型的故障, 如阶跃型故障、正弦型故障等^[16].

定义系统同步误差 $e(t) = x(t) - y(t)$, 则通过式(4)和(5)可以得到

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{y}(t) = Ae(t) + B_f f(t) + g(x(t)) - g(y(t)) - u(t). \quad (7)$$

混沌系统中所包含的非线性项满足如下引理.

引理1 对于任意给定的 $p, q \in R^s$, 总存在一个半正定矩阵 F , 使不等式 $(f(p) - f(q))^T (f(p) - f(q)) \leq (p - q)^T F (p - q)$ 成立.

1.2 基于动态事件触发的容错同步控制器设计

在考虑故障对系统影响的前提下, 设计如下的容错同步控制器:

$$u(t) = Ke(t_k) + B_f \hat{f}(t). \quad (8)$$

其中: t_k 为采样时刻, 在动态事件触发控制策略下, 具体采样时刻由触发规则决定; 矩阵 K 为控制器增益; $B_f \hat{f}(t)$ 为故障补偿器, 用来抵消主混沌系统中故障带来的影响; $\hat{f}(t)$ 为故障 $f(t)$ 的估计值, 通过下面的观测器得到:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_f &= A_{wf} \hat{x}_f(t) + v(t), \\ \hat{f}(t) &= C_{wf} \hat{x}_f(t). \end{aligned} \quad (9)$$

这里: $\hat{x}_f(t)$ 为故障状态 $x_f(t)$ 的估计值; $v(t)$ 的形式如下所示:

$$v(t) = K_f e(t_k), \quad (10)$$

K_f 为控制器增益.

定义 $e_f(t) = x_f(t) - \hat{x}_f(t)$, 则由式(6)~(10)可得

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{x}(t) - \dot{y}(t) = \\ &Ae(t) + B_f C_{wf} e_f(t) - Ke(t_k) + m(t), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_f(t) &= \dot{x}_f(t) - \dot{\hat{x}}_f = \\ &A_{wf} e_f(t) - K_f e(t_k) + B_{wf} f_0(t), \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $m(t) = g(x(t)) - g(y(t))$. 记 $\eta(t) = [e^T(t), e_f^T(t)]^T$. 由式(11)和(12)可得

$$\dot{\eta}(t) = \bar{A}\eta(t) - \bar{B}\eta(t_k) + \bar{B}_{wf} f_0(t) + Dm(t). \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \begin{bmatrix} A & B_f C_{wf} \\ 0 & A_{wf} \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = BH, \quad B = \begin{bmatrix} K \\ K_f \end{bmatrix}, \\ H &= [I \ 0], \quad \bar{B}_{wf} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{wf} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

为了求解控制器增益以实现混沌系统容错同

步, 定义系统性能指标函数并利用 Hamilton Jacobi Bellman(HJB)等式计算使系统性能指标函数达到最小. 针对系统(13), 设 $s(t_k) = \bar{B}\eta(t_k)$ 并定义如下的系统性能指标函数:

$$J = \int_0^\infty (\eta^T H^T F H \eta + \eta^T Q \eta + s^T R s) dt. \quad (14)$$

其中: $Q \geq 0, R > 0, F \geq 0$. 本文通过系统性能指标函数 J 求解容错同步控制器, 使系统的同步误差对于任意给定的初值 $x(0)$ 和 $y(0)$ 均满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \|e_f(t)\| = 0.$$

基于动态事件触发的故障容错混沌系统同步方法的控制框图如图1所示.

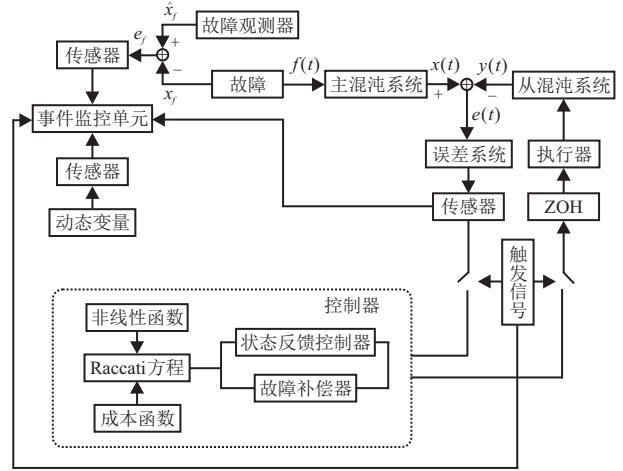


图1 系统控制框图

针对系统(13), 通过设计容错同步控制器 $s(t)$, 使如下系统性能指标函数达到最小:

$$\begin{aligned} \min_{s \in R^m} & (\eta^T H^T F H \eta + \eta^T Q \eta + s^T R s + \\ & V_\eta^T (\bar{A}\eta - \bar{B}\eta + \bar{B}_{wf} f_0 + Dm)). \end{aligned} \quad (15)$$

其中: $V(\eta(t)) = \eta^T S \eta \geq 0, V_\eta = \frac{\partial V}{\partial \eta}, s(t) = \bar{B}\eta(t)$. 假设 $V(\eta(t))$ 是系统(13)对应的ISS的Lyapunov函数, 则应满足如下的HJB等式:

$$\begin{aligned} & \eta^T H^T F H \eta + \eta^T Q \eta + s^T R s + \\ & V_\eta^T (\bar{A}\eta - \bar{B}\eta + \bar{B}_{wf} f_0 + Dm) = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

定义Hamiltonian函数为

$$\begin{aligned} H(\eta(t), s(t), V_\eta) &= \eta^T H^T F H \eta + \eta^T Q \eta + s^T R s + \\ & V_\eta^T (\bar{A}\eta - \bar{B}\eta + \bar{B}_{wf} f_0 + Dm), \end{aligned} \quad (17)$$

其中同步控制器 $s(t)$ 应满足

$$\frac{\partial H(\eta(t), s(t), V_\eta, t)}{\partial s(t)} = 2\eta^T \bar{B}^T R - V_\eta^T = 0. \quad (18)$$

通过求解如下的代数Riccati方程, 可以得到矩阵 S :

$$S\bar{A} + \bar{A}^T S + H^T F H + Q - S R^{-1} S = 0. \quad (19)$$

将所求结果代入式(18),可以计算出同步控制器 $s(t)$,即

$$s(t) = R^{-1} S \eta(t) = \bar{B} \eta(t) = B H \eta(t), \quad (20)$$

其中控制器增益矩阵 $B = R^{-1} S H^{-1}$. 将该控制器增益应用于系统(13)的采样状态 $\eta(t_k)$ 中,基于动态事件触发的采样控制器可以写成如下形式:

$$s(t_k) = \bar{B} \eta(t_k). \quad (21)$$

2 动态事件触发器设计

为了最大程度地减少系统之间的信息交互次数,降低对网络带宽的要求,通过引入动态变量 $\varepsilon(t)$ 来实现动态事件触发. $\varepsilon(t)$ 满足如下微分方程:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}(t) = -\chi(\varepsilon) + \sigma \alpha(\|\eta(t)\|) - \phi(\|\hat{\eta}(t)\|), \\ \varepsilon(0) = \varepsilon_0. \end{cases} \quad (22)$$

其中: χ 、 α 和 ϕ 是光滑的 k_∞ 函数, $\sigma \in (0, 1)$, $\hat{\eta}(t) = \eta(t_k) - \eta(t)$. $\varepsilon(t)$ 在所有时刻上均满足 $\varepsilon(t) \geq 0$ ^[21].

下面将给出所设计的非单调动态事件触发规则,并利用Lyapunov稳定性判据得到同步误差系统渐近稳定的充分条件.

定理1 在基于动态事件触发的同步控制器 $s(t_k) = \bar{B} \eta(t_k)$ 的作用下,混沌系统的容错同步问题可以转化为系统(13)的稳定性问题. 当采样时刻满足下式时:

$$\begin{cases} t_0 = 0, \\ t_{k+1} = \inf\{t \in R | t > t_k \wedge \varepsilon(t) + \\ \quad \theta_1(\mu_1 \|H\eta\| - \|H\hat{\eta}\|) + \\ \quad \theta_2(\mu_2 \|G\eta\| - \|G\hat{\eta}\|) \leq 0\}, \end{cases} \quad (23)$$

系统(13)渐近稳定,其控制器增益矩阵 $\bar{B}$ 在使系统性能指标函数(15)达到最小值的情况下求解得出. 式(23)中 $G = [0 \ I]$.

证明 针对系统(13),选取动态变量 $\varepsilon(t)$ 为

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}(t) = & -\lambda \varepsilon + (\mu_1 \|H\eta\| - \|H\hat{\eta}\|) + \\ & (\mu_2 \|G\eta\| - \|G\hat{\eta}\|). \end{aligned} \quad (24)$$

选取Lyapunov函数 $W(\eta(t), \varepsilon(t)) = V(\eta) + \varepsilon(t)$. 其中: $\varepsilon(t) \geq 0$,而 $V(\eta(t)) = \eta^T S \eta \geq 0$ 在矩阵 $S \geq 0$ 时恒成立. 因此, $W(\eta(t), \varepsilon(t))$ 对于任意时刻的 t 均满足 $W(\eta(t), \varepsilon(t)) \geq 0$. 对 $V(\eta(t))$ 求导,有

$$\begin{aligned} \dot{V}(\eta) = & 2\eta^T S \dot{\eta} = \\ & -\eta^T H^T F H \eta - \eta^T Q \eta - s^T R s - 2\eta^T S \bar{B} \hat{\eta} = \\ & -\eta^T (H^T F H - Q - \bar{B}^T R \bar{B}) \eta - 2\eta^T S \bar{B} \hat{\eta}. \end{aligned} \quad (25)$$

根据定义1,当选择 $\alpha(\|\eta\|)$ 、 $\gamma(\|\hat{\eta}\|)$ 为如下形式

时,式(3)成立:

$$\alpha(\|\eta\|) = \frac{\lambda_{\min}(Q_1)}{2} [\|H\eta\|^2 + \|G\eta\|^2], \quad (26)$$

$$\gamma(\|\hat{\eta}\|) = \frac{2\|S\bar{B}\bar{B}^T S\|}{\lambda_{\min}(Q_1)} [\|H\hat{\eta}\|^2 + \|G\hat{\eta}\|^2], \quad (27)$$

其中 $Q_1 = H^T F H - Q - \bar{B}^T R \bar{B}$.

结合式(23)、(26)和(27),当控制器不更新控制信号时,有不等式 $\|H\hat{\eta}\| \geq \mu_1 \|H\eta\|$, $\|G\hat{\eta}\| \geq \mu_2 \|G\eta\|$ 成立. 其中: $\mu_1 = \sqrt{\sigma_1} \lambda_{\min}(Q_1)/2\|S\bar{B}\|$, $\mu_2 = \sqrt{\sigma_2} \times \lambda_{\min}(Q_1)/2\|S\bar{B}\|$, $\sigma_1, \sigma_2 \in (0, 1)$.

基于上述推导,可以得到

$$\begin{aligned} \dot{W}(\eta(t), \varepsilon(t)) \leq & \frac{1}{2}(\sigma_1 - 1)\lambda_{\min}(Q_1)\|H\eta\|^2 + \\ & \frac{1}{2}(\sigma_2 - 1)\lambda_{\min}(Q_1)\|G\eta\|^2 - \lambda\varepsilon \leq \\ & (\sigma_1 - 1)\lambda_{\min}(Q_1)\|H\eta\|^2 + \\ & (\sigma_2 - 1)\lambda_{\min}(Q_1)\|G\eta\|^2 - \lambda\varepsilon. \end{aligned} \quad (28)$$

因为 $\varepsilon(t) \geq 0$,所以 $\dot{W}(\eta(t), \varepsilon(t)) \leq 0$ 在任意时刻均成立,故系统(13)渐近稳定. $\square$

注1 与文献[19]的动态触发相比,所设计的动态事件触发充分考虑了故障对系统的影响,当故障误差超过了所设定的阈值后,控制器中引入故障补偿器,可以实现混沌系统的容错同步.

注2 与文献[22]和文献[23]相比,本文引入的动态变量并不需要保证是单调的,从而提高了方法的实用性. 动态变量可以根据系统的实时状态,动态地调整触发参数,最大程度降低系统的信息交互次数,减少器件的损耗,延长各个设备的寿命.

3 仿真实例

为验证本文所提出方法的有效性,以如下Chua系统为例进行仿真:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = \varphi[x_2(t) - w(x_1(t))], \\ \dot{x}_2(t) = x_1(t) - x_2(t) + x_3(t), \\ \dot{x}_3(t) = -\psi x_2(t). \end{cases}$$

其中

$$\begin{aligned} w(x_1(t)) = & m_1 x_1(t) + \frac{1}{2}(m_0 - m_1)(|x_1(t) + c| - |x_1(t) - c|), \\ \varphi = & 9, \psi = 14.286, c = 1. \end{aligned}$$

主系统的初始状态 $x(0) = [0.75 \ -1 \ 1]^T$. 相关参数选择如下: $\sigma_1 = 0.5$, $\sigma_2 = 0.2$, $\theta_1 = 0.01$, $\theta_2 = 0.05$, $\lambda = 1$, $\varepsilon_0 = 0.01$, 矩阵 $Q = R = I$. 根据引理1可得矩阵

$$F = \begin{bmatrix} 3.857^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

主系统的相位轨迹如图2所示.

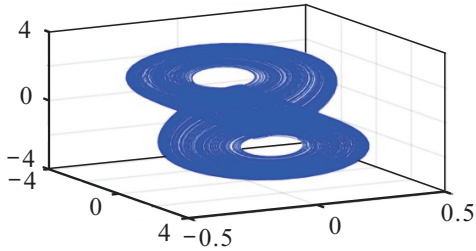


图2 主系统的相位轨迹

从系统选择与主系统相同的Chua系统,从系统的初始状态为 $y(0) = [0.3 \ -0.2 \ 0.1]^T$.

当主系统中发生故障时,主系统变为如下形式:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + f(x(t)) + B_f f(t).$$

其中: $B_f = [10; 0; 0]$; 故障 $f(t)$ 如下所示:

$$\dot{x}_f(t) = A_{wf} x_f(t) + B_{wf} f_0(t),$$

$$f(t) = C_{wf} x_f(t), \quad x_f(0) = 0.$$

这里: 系数矩阵

$$A_{wf} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{wf} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_{wf} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$f_0(t) = \beta \delta(t - t_f), \quad \beta = 10, \quad t_f = 10.$$

故障模型 $f(t)$ 如图3所示. 此时,主系统的相位轨迹如图4所示.

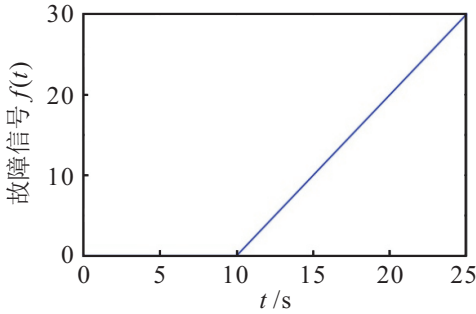


图3 故障信号

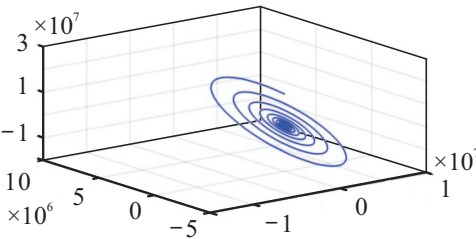


图4 带故障的主系统相位轨迹

由式(21)可以得到同步控制器增益

$$B = R^{-1} S H^{-1} = \begin{bmatrix} K \\ \bar{K} \end{bmatrix}.$$

其中

$$K = \begin{bmatrix} 1.8884 & 1.6136 & 0.1392 \\ 1.6136 & 4.5431 & -0.2109 \\ 0.1392 & -0.2109 & 0.3796 \end{bmatrix},$$
$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 0.0463 & -0.0018 & 0.0463 \\ 1.7890 & 1.9224 & 0.5951 \end{bmatrix}.$$

混沌系统状态误差如图5所示,故障系统状态误差如图6所示.

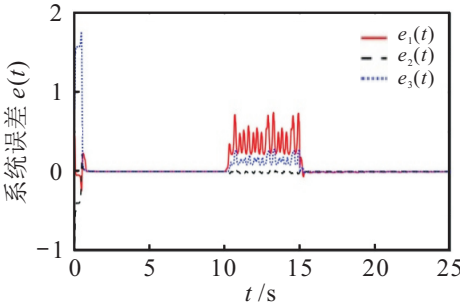


图5 主系统误差状态曲线

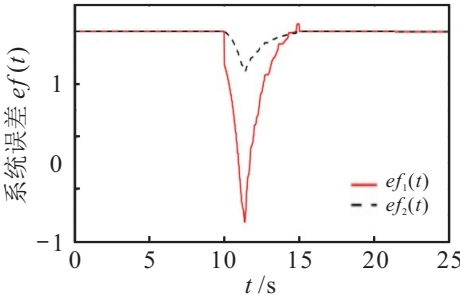


图6 故障系统误差状态曲线

由图5和图6中可以看出:当 $t < 10\text{s}$ 时,故障并未发生,混沌系统的同步控制器为 $u(t) = Ke(t_k)$,从系统状态在控制器的作用下可以在较短的时间内完全跟踪到主系统的状态;当 $t = 10\text{s}$ 时,故障发生,这时系统误差在瞬间变得很大,同步系统发散;当 $t = 14\text{s}$ 时,同步控制器中加入故障补偿器,变为 $u(t) = Ke(t_k) + B_f \hat{f}(t)$,在其控制作用下,混沌状态误差系统和故障误差状态差系统可以很快地达到稳定,从而实现混沌系统的故障容错同步.

图7为动态变量 $\varepsilon(t)$,可以看出:当主混沌系统未发生故障时,对于任意非零初始条件 ε_0 , $\varepsilon(t)$ 均满足 $\varepsilon(t) > 0$;当故障发生时,动态变量 $\varepsilon(t)$ 有一个向上的波动,动态地调整触发参数,减少触发次数,最大程度降低了状态信息在网络中的传播次数,减少网络带宽的压力,并且该动态变量不需要保持单调递减,更具有实用性.

图8为在动态事件触发条件下的同步控制信号.从中可以看出,控制器的更新次数减少,进一步说明了动态事件触发可以在保证故障容错的混沌系统同步的同时,减少主从系统之间的通信,缓解网络带

宽的压力.

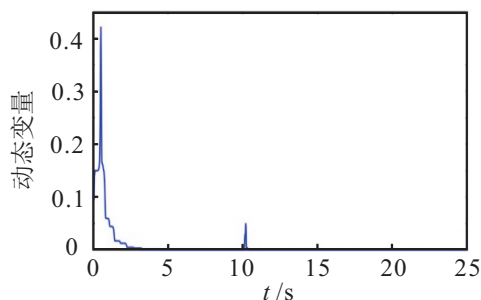
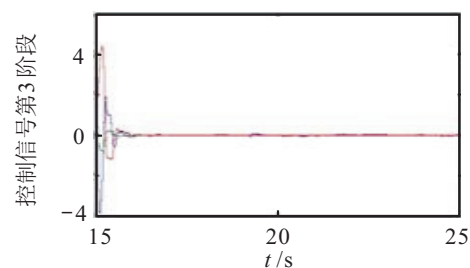
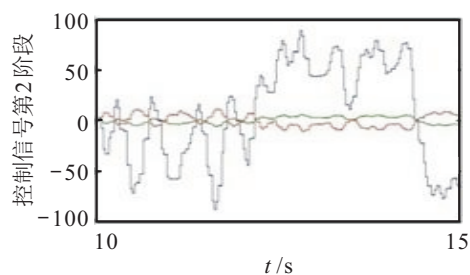
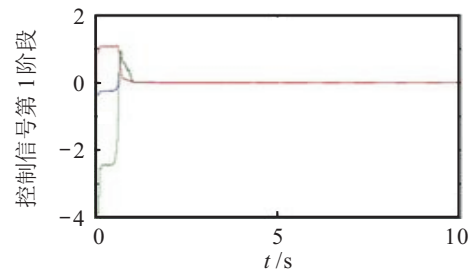
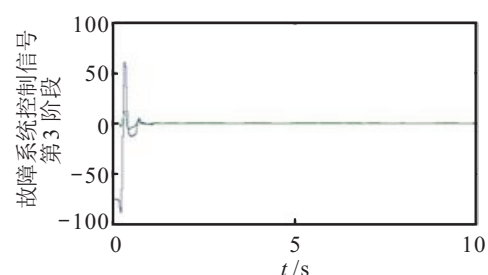
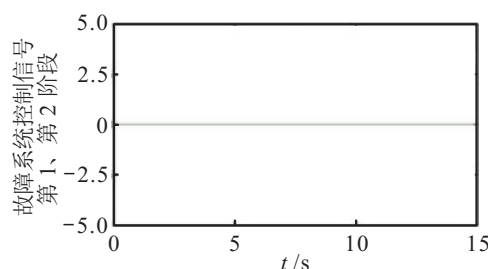


图7 动态变量状态曲线



(a) 触发条件下系统控制信号阶段曲线



(b) 触发条件下故障系统控制信号阶段曲线

图8 触发状态下的控制信号曲线

4 结 论

本文针对故障容错的混沌系统的同步问题,设计了一种基于动态事件触发的同步控制器. 基于输入-状态稳定性理论 (ISS) 和 Lyapunov 稳定性理论,给出了故障容错的混沌系统同步所需要的充分条件. 通过定义系统性能指标函数,给出了同步控制器的求解过程. 同时,在触发条件中引入动态变量,根据混沌系统的实时误差状态,动态地调节触发参数,使触发间隔时间更加合理,充分降低状态信息在网络中的传播次数,解决通信带宽低所带来的网络堵塞问题. 最后通过仿真验证了所提出方法的有效性.

参考文献 (References)

- [1] 许泽凯, 陈杰睿, 冯平, 等. 一种双重加密混沌掩盖通信保密方案[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(9): 1795-1797.
(Xu Z K, Chen J R, Feng P, et al. A dual encryption chaotic masking secure communication scheme[J]. Computer and Digital Engineering, 2017, 45(9): 1795-1797.)
- [2] 邹涛. 浅析混沌形状同步控制及在保密通信中的应用[J]. 信息通信, 2016, 168: 33-34.
(Zou T. Chaos shape synchronization control and its application in secure communication[J]. Information and Communications, 2016, 168: 33-34.)
- [3] 李亮, 常娟, 毛北行. 两类光学二次谐波系统的复混沌同步[J]. 陕西理工学院学报: 自然科学版, 2016, 32(3): 87-92.
(Li L, Chang J, Mao B X. Optical chaos synchronization in second harmonic generation complex systems[J]. J of Shaanxi University of Technology: Natural Sciences, 2016: 32(3): 87-92.)
- [4] 张友安, 余名哲, 吴华丽. 基于自适应神经网络的分数阶混沌系统滑模同步[J]. 控制与决策, 2015, 30(5): 882-886.
(Zhang Y A, Yu M Z, Wu H L. Sliding mode synchronization of fractional-order chaotic systems based on adaptive neural network[J]. Control and Decision, 2015, 30(5): 882-886.)
- [5] 吴建辉, 章兢, 刘朝华. 基于改进粒子群优化算法的离散混沌系统神经滑模控制[J]. 控制与决策, 2013, 28(7): 1094-1098.
(Wu J H, Zhang J, Liu Z H. Neural network sliding mode control based on improved particle swarm optimization algorithm for discrete-time chaotic systems[J]. Control and Decision, 2013, 28(7): 1094-1098.)
- [6] 陈晔, 李生刚, 刘恒. 基于自适应模糊控制的分数阶混沌系统同步[J]. 物理学报, 2016, 65(17): 251-261.
(Chen Y, Li S G, Liu H. Synchronization of

- fractional-order chaotic systems based on adaptive fuzzy control[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(17): 251-261.)
- [7] Liu J, Liu K, Liu S. Adaptive control for a class of nonlinear complex dynamical systems with uncertain complex parameters and perturbations[J]. *Plos One*, 2017, 12(5): e0175730.
- [8] 姜伟, 王宏力, 陆敬辉, 等. 基于参数依赖动态输出反馈鲁棒MPC的混沌系统同步[J]. *控制与决策*, 2018, 33(1): 67-73.
(Jiang W, Wang H L, Lu J H, et al. Chaos synchronization via parameter-dependent dynamic output feedback robust MPC[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(1): 67-73.)
- [9] 高俊山, 宋歌, 邓立为. 具有未知参数的混沌系统的有限时间滑模同步控制[J]. *控制与决策*, 2017, 32(1): 149-156.
(Gao J S, Song G, Deng L W. Finite-time sliding mode synchronization control of chaotic systems with uncertain parameters[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(1): 149-156.)
- [10] Liu J, Liu S. Complex modified function projective synchronization of complex chaotic systems with known and unknown complex parameters[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2017, 48: 440-450.
- [11] Liu J, Liu S, Sprott J C. Adaptive complex modified hybrid function projective synchronization of different dimensional complex chaos with uncertain complex parameters[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 83(1/2): 1109-1121.
- [12] Liu J. Complex modified hybrid projective synchronization of different dimensional fractional-order complex chaos and real hyper-chaos[J]. *Entropy*, 2014, 16(12): 6195-6211.
- [13] He S, Sun K, Wang H. Synchronisation of fractional-order time delayed chaotic systems with ring connection[J]. *European Physical J Special Topics*, 2016, 225(1): 97-106.
- [14] Farivar F, Shoorehdeli M A, Nekoui M A. Synchronization of underactuated unknown heavy symmetric chaotic gyroscopes via optimal gaussian radial basis adaptive variable structure control[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2013, 21(6): 2374-2379.
- [15] Ma H J, Yang G H. Adaptive fault tolerant control of cooperative heterogeneous systems with actuator faults and unreliable interconnections[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2016, 61(11): 3240-3255.
- [16] Zhong M Y, Han Q L. Fault-tolerant master-slave synchronization for Lur'e systems using time-delay feedback control[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems I Regular Papers*, 2009, 56(7): 1391-1404.
- [17] Åström K J, Bo B. Comparison of periodic and event based sampling for first order stochastic systems[C]. *Proc of IFAC World Congress*. Beijing, 1999: 301-306.
- [18] Wen G H, Chen M Z Q, Yu X. Event-triggered master-slave synchronization with sampled-data communication[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems II Express Briefs*, 2017, 63(3): 304-308.
- [19] Hashimoto K, Adachi S, Dimarogonas D V. Self-triggered model predictive control for nonlinear input-affine dynamical systems via adaptive control samples selection[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2017, 62(1): 177-189.
- [20] Hu W, Liu L, Feng G. Output consensus of heterogeneous linear multi-agent systems by distributed event-triggered/self-triggered strategy[J]. *IEEE Trans on Cybernetics*, 2017, 47(8): 1914-1924.
- [21] Girard A. Dynamic triggering mechanisms for event-triggered control[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2015, 60(7): 1992-1997.
- [22] Mu N, Liao X, Huang T. Event-based consensus control for a linear directed multiagent system with time delay[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems II Express Briefs*, 2015, 62(3): 281-285.
- [23] Zhu W, Jiang Z P. Event-based leader-following consensus of multi-agent systems with input time delay[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2015, 60(5): 1362-1367.

(责任编辑: 李君玲)