

7-3-2020

Co-design Between Robust H_∞ Guaranteed Cost Fault-tolerant and Communication for NNCS Based on Event-triggered

Li Wei

College of Electrical and information engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

Kun Yan

College of Electrical and information engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

Yajie Li

College of Electrical and information engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Co-design Between Robust H_∞ Guaranteed Cost Fault-tolerant and Communication for NNCS Based on Event-triggered

Abstract

Abstract: Based on the discrete event-triggered communication scheme (DETCs), the co-design between robust H_∞ guaranteed cost fault-tolerant control and communication was studied for uncertain nonlinear networked control system (NNCS) with actuator failures. Firstly, a new closed-loop failure model was established by introducing the DETCS and adopting state feedback control strategy. Then, based on the Lyapunov stability theory and less-conservative technology, the sufficient condition of NNCS with robust H_∞ guaranteed cost was derived, which was the time-delay/event-dependent approach, moreover, some optimal co-design methods between the fault tolerant controller and event-triggered weight matrix were given. Furthermore, the co-design problems of fault-tolerant control and discrete event-triggered communication were discussed under different index constraints. Finally, a simulation example illustrates the effectiveness of the proposed approach.

Keywords

Nonlinear networked control system, discrete event-triggered communication scheme, guaranteed cost fault-tolerant control, co-design

Recommended Citation

Li Wei, Yan Kun, Li Yajie. Co-design Between Robust H_∞ Guaranteed Cost Fault-tolerant and Communication for NNCS Based on Event-triggered[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(5): 1140-1149.

事件触发 NNCS 鲁棒 H_∞ 保性能容错与通讯协同设计

李炜, 阎坤, 李亚洁

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 基于离散事件触发通讯机制(DETCS, discrete event-triggered communication scheme), 研究了执行器故障下不确定非线性网络化控制系统的鲁棒 H_∞ 保性能容错控制与通讯协同设计问题。引入 DETCS, 采用状态反馈控制策略, 建立了闭环故障系统模型; 结合 Lyapunov 稳定性理论及少保守性技术, 得到了 DETCS 下使系统具有鲁棒 H_∞ 保性能容错控制的时滞/事件依赖的充分条件, 提供控制器与事件触发权矩阵协同优化求解的方法, 讨论了几种不同目标约束下鲁棒控制与 DETCS 的协同设计问题; 通过仿真实例验证了所述方法的有效性。

关键词: 非线性网络化控制系统; 离散事件触发通讯机制; H_∞ 保性能容错控制; 协同设计

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 05-1140-10

Co-design Between Robust H_∞ Guaranteed Cost Fault-tolerant and Communication for NNCS Based on Event-triggered

Li Wei, Yan Kun, Li Yajie

(College of Electrical and information engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on the discrete event-triggered communication scheme (DETCS), the co-design between robust H_∞ guaranteed cost fault-tolerant control and communication was studied for uncertain nonlinear networked control system (NNCS) with actuator failures. Firstly, a new closed-loop failure model was established by introducing the DETCS and adopting state feedback control strategy. Then, based on the Lyapunov stability theory and less-conservative technology, the sufficient condition of NNCS with robust H_∞ guaranteed cost was derived, which was the time-delay/event-dependent approach, moreover, some optimal co-design methods between the fault tolerant controller and event-triggered weight matrix were given. Furthermore, the co-design problems of fault-tolerant control and discrete event-triggered communication were discussed under different index constraints. Finally, a simulation example illustrates the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: Nonlinear networked control system; discrete event-triggered communication scheme; H_∞ guaranteed cost fault-tolerant control; co-design

引言

随着科学技术的发展与进步, 系统的复杂程度

和现代化水平越来越高。当传统的点对点控制方式很难满足日益复杂的系统要求时, 一种以网络作为传输媒介的闭环反馈控制系统-网络化控制系统(NCS, networked control system)应运而生并逐渐受到广泛重视。但由于其频带宽度和服务能力的限制, 使得系统在运行的同时伴随着时延、丢包等问题^[1-3]。现代 NCS 无论在结构还是功能等方面都日



收稿日期: 2014-12-20 修回日期: 2015-05-27;
基金项目: 国家自然科学基金(61364011); 甘肃省自然科学基金(1308RJZA418);
作者简介: 李炜(1963-), 女, 陕西西安, 教授, 博导, 研究方向为动态系统的故障诊断与容错控制; 阎坤(1990-), 男, 河南漯河, 硕士, 研究方向为容错控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 1140 •

趋庞大、复杂,一旦发生故障就有可能造成人员和财产的巨大损失。因此,对 NCS 进行容错控制设计具有理论和现实意义,并且受到了广泛关注^[4-6]。根据被控对象模型和系统性能指标的不同,关于 NCS 的容错控制研究已有不少成果。如文献[7-12]分别针对存在时延和丢包的线性 NCS 和非线性 NCS(Nonlinear NCS, NNCS),研究了系统在执行器失效故障下的相关鲁棒容错控制问题。然而,上述研究成果均是基于周期时间触发通讯机制(periodic time-triggered communication scheme, PTTCS)的。一方面,在 PTTCS 下,所有数据均会按固定的采样周期传输给控制器,这样即使在系统平衡点附近也会有大量的冗余数据被传输,从而造成了网络资源的浪费,也加剧了网络拥塞、时延与丢包,甚至会使系统失稳。另一方面,在 PTTCS 下的 NCS 容错设计只能被动地依赖网络现存的服务质量孤立进行,无法做到系统性能与网络服务质量的兼顾与协调。

因此,在确保满足系统性能的同时,又能使有限的网络资源得到充分的节约和利用,一种依据控制需求进行数据传输的通讯机制,即离散事件触发通讯机制(discrete event-triggered communication scheme, DETCS)开始进入人们的视野^[13-15]。DETCS 是一种新的触发通讯机制,它仅在采样时刻检测并计算与前一传输时刻的状态误差,进而与预先设定好的阈值比较,以此来决定系统状态数据是否被传输。其中文献[13]针对存在时变时延的 NNCS,基于 DETCS 得到了系统具有鲁棒 H_∞ 性能的准则;文献[14]研究了在 DETCS 下经过量化的线性闭环 NCS 的稳定性问题;文献[15]在 DETCS 下,仅对线性 NCS 的鲁棒完整性设计问题进行了初步的研究。综览已有的研究成果,对 DETCS 下 NNCS H_∞ 保性能的容错控制研究还鲜有报道。

因此,本文将针对存在时变时延、执行器故障、参数摄动和有限能量扰动的 NNCS,基于 DETCS,采用状态反馈控制策略,通过建模先将网络属性、执行器故障及通讯机制统一在框架下,然后借助

Lyapunov 稳定性理论与少保守性技术推证使 NNCS 具有鲁棒 H_∞ 保性能容错的时滞/事件共同依赖的充分条件,此后进一步讨论了几种不同目标约束下鲁棒控制与 DETCS 的协同设计问题。最后通过实例验证该方法的有效性,并分析不同触发参数对系统性能和网络通讯资源占用的影响。

1 问题描述

1.1 DETCS 的引入

DETCS 是指在 NCS 中引入一个事件触发器,首先根据系统的控制需求设计触发约束条件,然后依据系统的状态或状态误差等事件能否满足该触发条件来决定信息是否传输的一类通讯机制。其结构示意如图 1 所示。

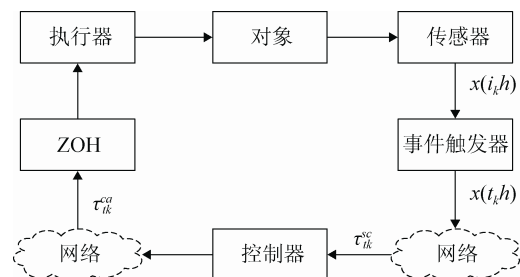


图 1 DETCS 下 NCS 结构示意图

图 1 中,传感器由时钟驱动,控制器、执行器和零阶保持器 ZOH 由事件驱动, $\tau_{t_k}^{sc}$ 为从传感器到控制器的网络时延, $\tau_{t_k}^{ca}$ 为从控制器到执行器的网络时延, $\tau_{t_k}^c$ 为计算时延,若采用静态状态反馈控制,则系统在传输时刻 $t_k h$ 的总时延可归并为 $\tau_{t_k} = \tau_{t_k}^{sc} + \tau_{t_k}^{ca} + \tau_{t_k}^c$ 。

为方便分析,作如下假设:

假设 1: 采样周期为 h , 采样时刻记为 $i_k h$ ($i_k \in \mathbb{N}$)。设 $t_k h$ 为数据传输时刻,则传输时刻集合为 $\{t_k h | t_k \in \mathbb{N}\}$ 。显然有 $\{t_k h | t_k \in \mathbb{N}\} \subseteq \{i_k h | i_k \in \mathbb{N}\}$ 。

假设 2: ZOH 的保持区域为 $t \in \Omega$, 为便与说明,将其划分为以下间隔子集区间: $\Omega = \bigcup \Omega_\ell$, $\Omega_\ell = [i_k h + \tau_{i_k}^{sc}, i_k h + h + \tau_{i_k+1}^{sc})$ 。其中 $i_k h$ 表示最新采样时刻,且 $i_k h = t_k h + l h$, $l = 0, \dots, t_{k+1} - t_k - 1$, τ_{i_k} 为

$i_k h$ 时刻网络时延。

设系统前一个最新传输的数据为 $\mathbf{x}(t_k h)$ ，当前采样数据为 $\mathbf{x}(i_k h)$ ，同时考虑系统控制需求和网络资源节约，采用如下事件触发通讯条件

$$[\mathbf{x}(i_k h) - \mathbf{x}(t_k h)]^T \Phi [\mathbf{x}(i_k h) - \mathbf{x}(t_k h)] \geq \sigma \mathbf{x}^T(i_k h) \Phi \mathbf{x}(i_k h) \quad (1)$$

式中： Φ 是正定对称矩阵； σ 是事件触发参数，且 $\sigma \in [0, 1)$ 。为分析方便，定义状态误差向量

$$\mathbf{e}(i_k h) = \mathbf{x}(i_k h) - \mathbf{x}(t_k h) \quad (2)$$

则触发通讯条件(1)又可以写成如下不等式

$$\mathbf{e}^T(i_k h) \Phi \mathbf{e}(i_k h) \geq \sigma \mathbf{x}^T(i_k h) \Phi \mathbf{x}(i_k h) \quad (3)$$

注 1 由式(3)可知，并非所有的采样数据均会被传输，只有满足该式的数据才能使事件触发器触发并将此刻数据传递至控制器。由此看来该通讯机制下只有部分采样数据被传输，因此可减少整体数据传输量，缓解网络带宽的压力，节省网络资源。

注 2 式(3)中触发参数 σ 可诠释为系统状态允许的动态波动率，它的变化意味着系统性能约束的变化。这表明引入 DETCS 后，数据传输与否会依据系统控制需求而定，从而做到了真正意义上的按需传输，最终使网络资源得到有效的节约和利用。这也建立起了控制系统性能与网络资源利用率之间的内在联系。

1.2 不确定闭环故障 NNCS 模型的建立

考虑由如下模糊规则 i 描述的不确定 NNCS 被控对象：

设 $\theta(t) = [\theta_1(t), \theta_2(t), \dots, \theta_n(t)]^T$ 是模糊前件变量， F_{ij} 是模糊集合， N 是模糊推理规则数，模糊规则 i ：如果 $\theta_1(t)$ 是 F_{i1} ， $\theta_2(t)$ 是 F_{i2} ， $\dots$ ， $\theta_n(t)$ 是 F_{in} ，则

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \bar{\mathbf{A}}_i \mathbf{x}(t) + \bar{\mathbf{B}}_i \mathbf{u}(t) + \mathbf{B}_{li} w(t) \\ \mathbf{z}(t) &= \mathbf{C}_i \mathbf{x}(t) \quad i=1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$ ， $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^m$ ， $w(t) \in L_2[0, \infty)$ ， $\mathbf{z}(t) \in \mathbf{R}^l$ 分别是系统的状态变量、控制输入、控制输出和外部有限能量扰动； $\bar{\mathbf{A}}_i = \mathbf{A}_i + \Delta \mathbf{A}_i$ ， $\bar{\mathbf{B}}_i = \mathbf{B}_i + \Delta \mathbf{B}_i$ ， $\mathbf{A}_i$ ， $\mathbf{B}_i$ ， $\mathbf{B}_{li}$ 和 $\mathbf{C}_i$ 分别为具有适当维数的常数矩阵，

$\Delta \mathbf{A}_i$ 和 $\Delta \mathbf{B}_i$ 是范数有界的时变参数不确定性矩阵，其形式为 $[\Delta \mathbf{A}_i, \Delta \mathbf{B}_i] = \mathbf{D} \mathbf{F}(t) [\mathbf{E}_{ai}, \mathbf{E}_{bi}]$ 。 $\mathbf{D}$ ， $\mathbf{E}_{ai}$ 和 $\mathbf{E}_{bi}$ 是已知的适当维数常矩阵； $\mathbf{F}(t)$ 是具有 Lebesgue 可测的未知函数矩阵，并满足 $\mathbf{F}^T(t) \mathbf{F}(t) \leq \mathbf{I}$ 。

按照文献[11]的方法对 NNCS(4)进行模糊处理，可得相应的系统模型为：

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \sum_{i=1}^N \lambda_i(\theta(t)) [\bar{\mathbf{A}}_i \mathbf{x}(t) + \bar{\mathbf{B}}_i \mathbf{u}(t) + \mathbf{B}_{li} w(t)] \\ \dot{\mathbf{z}}(t) &= \sum_{i=1}^N \lambda_i(\theta(t)) \mathbf{C}_i \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $\lambda_i(\theta(t)) = a_i(\theta(t)) / \sum_{i=1}^N a_i(\theta(t))$ ， $a_i(\theta(t)) =$

$\prod_{j=1}^n F_{ij}(\theta_j(t))$ ， $F_{ij}(\theta_j(t))$ 是 $\theta_j(t)$ 关于 F_{ij} 的隶属函数，设 $a_i(\theta(t)) \geq 0$ ($i=1, 2, \dots, N$) 且 $\sum_{i=1}^N a_i(\theta(t)) > 0$ ，

则 $\lambda_i(\theta(t)) \geq 0$ ，且 $\sum_{i=1}^N \lambda_i(\theta(t)) = 1$ 。

1.3 DETCS 下的闭环故障 NNCS

假设系统的所有状态均可测量，采用状态反馈控制策略，同样根据模糊规则 i ，设计控制器如下

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_i \mathbf{x}(t_k h), t \in [t_k h + \tau_{t_k}, t_{k+1} h + \tau_{t_{k+1}}) \quad (6)$$

其中， $\mathbf{K}_i$ ($i=1, 2, \dots, N$) 是各模糊子系统的控制器增益， τ_{t_k} ， $\tau_{t_{k+1}}$ 分别是 $t_k h$ ， $t_{k+1} h$ 时刻传输时延。

定义

$$\tau(t) = t - i_k h, \quad t \in \Omega_i \quad (7)$$

则 $\tau(t)$ 满足 $0 < \tau_1 \leq \tau(t) \leq \tau_2 = h + \bar{\tau}$ ， $\dot{\tau}(t) = 1$ ，这里 τ_1 和 $\bar{\tau}$ 分别为总时延下界和最大允许传输时延上界。应用并行分布补偿算法(PDC)，并结合式(2)、(6)、(7)， $\mathbf{u}(t)$ 可表示为

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(\theta(t)) \mathbf{K}_i [\mathbf{x}(t - \tau(t)) - \mathbf{e}(i_k h)] \quad (8)$$

注 3 与 PPTCS 下的控制量相比，式(8)表述的控制量中增加了与触发事件相关的状态误差 $\mathbf{e}(i_k h)$ ，使得控制量成为状态、时滞及状态误差共同依赖的变量。这也昭示出事件触发条件的引入，建立起了控制量与通讯约束条件之间的内在联系。

考虑执行器可能发生更一般的失效故障, 引入开关矩阵 L 来表示故障的程度, 其模型描述为

$$L = \text{diag}\{l_1, l_2, \dots, l_m\}$$

其中, $l_q = \begin{cases} 1, & \text{第 } q \text{ 个执行器正常} \\ 0, & \text{第 } q \text{ 个执行器失效} \\ (0,1), & \text{第 } q \text{ 个执行器部分失效} \end{cases}, l_q \in [0,1],$
 $q=1,2,\dots,m$ 。

结合(2), (5), (8)及执行器故障, 得到 DETCS 下非线性网络化闭环故障系统(nonlinear networked closed-loop fault system, NNCFS)模型为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i(\theta(t)) \lambda_j(\theta(t)) [\bar{A}_i x(t) + \\ &\quad \bar{B}_i L K_j x(t - \tau(t)) - \bar{B}_i L K_j e(i_k h) + B_{li} w(t)] \\ \dot{z}(t) &= \sum_{i=1}^N \lambda_i(\theta(t)) C_i x(t) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, 初始状态 $x(t_0) = x_0$, $t \in [t_0 - \tau_2, t_0]$ 。

注 4 在模型(9)中, 不仅包含了执行器故障、传输时延 $\tau(t)$ 、参数摄动以及有限能量扰动等各种因素, 更重要的是借助于 $e(i_k h)$ 将 DETCS 融入其中, 使系统故障、网络时延、内外不确定性及通讯机制统一在了同一理论框架下, 从而将 NNCS 容错与通讯的协同设计成为可能。

2 主要结果

2.1 DETCS 下不确定 NNCFS 的鲁棒 H_∞ 保性能容错与网络通讯的协同设计

对 NNCFS (9), 定义系统性能指标函数

$$J = \int_0^\infty [x^T(t) T_1 x(t) + u^T(t) T_2 u(t)] dt \quad (10)$$

其中, T_1 , T_2 分别为给定的正定对称矩阵。

在 DETCS 下, 考虑网络时变时延、执行器故障、参数摄动及有限能量扰动, 不确定 NNCFS 的鲁棒 H_∞ 保性能容错与网络通讯的协同设计目标为: 寻求状态反馈增益阵 K_j ($j=1,2,\dots,N$) 和离散事件触发权矩阵 Φ , 使 NNCFS (9) 满足如下条件:

1) 对允许的参数不确定性, 在 $w(t)=0$ 时, 无扰不确定 NNCFS (9) 渐近稳定;

2) 在 $w(t)=0$ 时, 系统性能指标函数(10)存在上确界 J^* , 即有 $J \leq J^*$;

3) 在零初始条件下, 对任意不为零的 $w(t) \in L_2[0, \infty)$, 控制输出满足 $\|z(t)\|_2 \leq \gamma \|w(t)\|_2$, 其中: γ 是预先给定的常数, $\|\cdot\|_2$ 是 $L_2[0, \infty)$ 范数。

定理 1 在 DETCS 下, 对于 NNCFS (9) 和性能指标(10), 给定常数 γ , 正数 $\sigma \in [0,1]$, τ_1 , τ_2 , 若存在正定对称矩阵 X , V 及矩阵 $R_i > 0$, ($i=1,2,\dots,6$), 使得对任意可能的执行器故障集 L 及可接受的参数不确定性, 满足如下矩阵不等式

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_1 & \Phi_2 \\ * & \Phi_3 \end{bmatrix} < 0 \quad (11)$$

式中: $\Phi_1 = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \Phi_{13} & \Phi_{14} & 0 & \Phi_{16} & D & \Phi_{18} \\ * & \Phi_{22} & \Phi_{23} & \Phi_{24} & 0 & 0 & 0 & \Phi_{28} \\ * & * & \Phi_{33} & \Phi_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & \Phi_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Phi_{55} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & \Phi_{66} & 0 & \Phi_{68} \\ * & * & * & * & * & * & -\varepsilon^{-1} I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & -\varepsilon I \end{bmatrix}$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} B_{li} & X C_i^T & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_j^T \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Y_j^T \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_3 = \begin{bmatrix} -\gamma^2 I & 0 & 0 & 0 \\ * & -I & 0 & 0 \\ * & * & -T_1^{-1} & 0 \\ * & * & * & -T_2^{-1} \end{bmatrix}$$

式中: $*$ 是对称矩阵的矩阵块, $\Phi_{11} = A_i X + X A_i^T - 2X + R_3 + R_4 - R_1$, $\Phi_{12} = B_i L Y_j$, $\Phi_{13} = 2X - R_3$, $\Phi_{14} = 2X - R_4$, $\Phi_{16} = -B_i L Y_j$, $\Phi_{18} = X E_{ai}^T$, $\Phi_{22} = \sigma(2X - V) + 2R_5 - R_6 - R_6^T$, $\Phi_{23} = -R_5 + R_6$, $\Phi_{24} = -R_5 + R_6^T$, $\Phi_{28} = (E_{bi} L Y_j)^T$, $\Phi_{33} = R_1 + R_3 + R_5 - R_2 - 4X$, $\Phi_{34} = 2X - R_6^T$, $\Phi_{44} = R_2 + R_4 + R_5 - 6X$, $\Phi_{55} = \tau_1^2(2X - R_3) + \tau_2^2(2X - R_4) + \tau_{21}^2(2X - R_5)$,

$$\Phi_{66} = -2X + V, \quad \Phi_{68} = -(E_{bi}LY_j)^T, \quad \tau_{21} = \tau_2 - \tau_1.$$

则存在状态反馈控制律(8), 使得不确定 NNCFS (9)在无扰时是渐近稳定且具有性能指标(10), 而有扰时又具有扰动抑制律 γ 。控制器增益和事件触发权矩阵可通过 $K_j = Y_j X^{-1}$ 和 $\Phi = V^{-1}$ 求取。性能指标 J 存在上确界 J^*

$$J^* = x^T(0)Px(0) + \int_{-\tau_1}^0 x^T(s)Q_1x(s)ds + \int_{-\tau_2}^{-\tau_1} x^T(s)Q_2x(s)ds + \int_{-\tau_1}^0 \int_{\theta}^t \tau_1 \dot{x}^T(s)Q_3\dot{x}(s)dsd\theta + \int_{-\tau_2}^0 \int_{\theta}^t \tau_2 \dot{x}^T(s)Q_4\dot{x}(s)dsd\theta + \int_{-\tau_2}^{-\tau_1} \int_{\theta}^t \tau_{21} \dot{x}^T(s)Q_5\dot{x}(s)dsd\theta \quad (12)$$

证明 构造 Lyapunov 函数

$$V(t) = x^T(t)Px(t) + \int_{t-\tau_1}^t x^T(s)Q_1x(s)ds + \int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1} x^T(s)Q_2x(s)ds + \int_{-\tau_1}^0 \int_{t+\theta}^t \tau_1 \dot{x}^T(s)Q_3\dot{x}(s)dsd\theta + \int_{-\tau_2}^0 \int_{t+\theta}^t \tau_2 \dot{x}^T(s)Q_4\dot{x}(s)dsd\theta + \int_{-\tau_2}^{-\tau_1} \int_{t+\theta}^t \tau_{21} \dot{x}^T(s)Q_5\dot{x}(s)dsd\theta \quad (13)$$

其中, $P^T = P > 0$, $Q_i^T = Q_i > 0, i = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

为证明方便, 记 $x(t) = x$, $x(t - \tau(t)) = x_\tau$, $x(t - \tau_1) = x_{\tau_1}$, $x(t - \tau_2) = x_{\tau_2}$, $\lambda_i(\theta(t)) = \lambda_i$, $\lambda_j(\theta(t)) = \lambda_j$, $u(t) = u$ 。在 $w(t) = 0$ 时, 沿系统(9)对 $V(t)$ 求导, 并结合参考文献[15]中的引理 1 和引理 2 得到

$$\dot{V}(t) \leq \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j [\eta(t)^T \Phi' \eta(t)] - x^T T_1 x - u^T T_2 u \quad (14)$$

式中: $\eta(t) = [x^T \quad x_\tau^T \quad x_{\tau_1}^T \quad x_{\tau_2}^T \quad \dot{x}^T \quad e^T(i_k h)]^T$,

$$\Phi' = \begin{bmatrix} \Phi'_{11} & \Phi'_{12} & Q_3 & Q_4 & 0 & \Phi'_{16} \\ * & \Phi'_{22} & \Phi'_{23} & \Phi'_{24} & 0 & \Phi'_{26} \\ * & * & \Phi'_{33} & M^T & 0 & 0 \\ * & * & * & \Phi'_{44} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Phi'_{55} & 0 \\ * & * & * & * & * & \Phi'_{66} \end{bmatrix}.$$

$$\text{其中, } \Phi'_{11} = P\bar{A}_i + \bar{A}_i^T P + Q_1 - Q_3 - Q_4 + T_1, \Phi'_{12} = P\bar{B}_i L K_j, \Phi'_{16} = -P\bar{B}_i L K_j, \Phi'_{22} = \sigma V - 2Q_5 + M^T + M + K_j^T T_2 K_j, \Phi'_{23} = Q_5 - M, \Phi'_{24} = Q_5 - M^T, \Phi'_{26} = -K_j^T T_2 K_j, \Phi'_{33} = Q_2 - Q_1 - Q_3 - Q_5, \Phi'_{44} = -Q_2 - Q_4 - Q_5, \Phi'_{55} = \tau_1^2 Q_3 + \tau_2^2 Q_4 + \tau_{21}^2 Q_5, \Phi'_{66} = -V + K_j^T T_2 K_j.$$

若 $\Phi' < 0$, 则有

$$\dot{V}(t) \leq -x^T T_1 x - u^T T_2 u < 0 \quad (15)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论可得无扰系统(10)是渐近稳定, 至此条件 1)得证。

对式(15)两边从 $t = 0 \sim \infty$ 积分, 同时利用系统稳定性可得

$$J = \int_0^\infty [x^T(t)T_1x(t) + u^T(t)T_2u(t)]dt \leq J^* = x^T(0)Px(0) + \int_{-\tau_1}^0 x^T(s)Q_1x(s)ds + \int_{-\tau_2}^{-\tau_1} x^T(s)Q_2x(s)ds + \int_{-\tau_1}^0 \int_{\theta}^t \tau_1 \dot{x}^T(s)Q_3\dot{x}(s)dsd\theta + \int_{-\tau_2}^0 \int_{\theta}^t \tau_2 \dot{x}^T(s)Q_4\dot{x}(s)dsd\theta + \int_{-\tau_2}^{-\tau_1} \int_{\theta}^t \tau_{21} \dot{x}^T(s)Q_5\dot{x}(s)dsd\theta \quad (16)$$

至此得到了条件 2)的结果。

在零初始状态条件下, 对任意不为零的 $w(t) \in L_2[0, \infty)$ 且 $w(t) \neq 0$, 考虑如下性能指标

$$J_1 = \int_0^t [z^T(s)z(s) - \gamma^2 w^T(s)w(s)]ds = \int_0^t [z^T(s)z(s) - \gamma^2 w^T(s)w(s) + \dot{V}(t)]ds - V(t) \leq \int_0^t [z^T(s)z(s) - \gamma^2 w^T(s)w(s) + \dot{V}(t)]ds \quad (17)$$

由前述无扰系统 $\dot{V}(t)$ 的推导过程及 $w(t) \neq 0$, 可得

$$J_1 \leq \xi^T(t)\Phi''\xi(t) \quad (18)$$

式中: $\xi(t) = [\eta(t)^T \quad w(t)^T]^T$,

$$\Phi'' = \begin{bmatrix} \Phi''_{11} & \Phi''_{12} & Q_3 & Q_4 & 0 & \Phi''_{16} & PB_{li} \\ * & \Phi''_{22} & \Phi''_{23} & \Phi''_{24} & 0 & \Phi''_{26} & 0 \\ * & * & \Phi''_{33} & M^T & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & \Phi''_{44} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Phi''_{55} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & \Phi''_{66} & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix}.$$

其中, $\Phi''_{11} = \Phi'_{11} + C_i^T C_i$, Φ''_{12} , Φ''_{16} , Φ''_{22} , Φ''_{23} , Φ''_{24} , Φ''_{26} , Φ''_{33} , Φ''_{44} , Φ''_{55} , Φ''_{66} 同式(14)中 Φ' 对应下标取值。

若 $\Phi'' < 0$, 则 $J_1 < 0$, 由式(17)和(18)得

$$\int_0^t [z^T(s)z(s) - \gamma^2 w^T(s)w(s) + \dot{V}(t)] ds < 0$$

进一步利用零初始条件得

$$V(t) + \int_0^t [z^T(s)z(s)] ds < \gamma^2 \int_0^t [w^T(s)w(s)] ds。$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\|z(t)\|_2 \leq \gamma \|w(t)\|_2$, 至此条件 3) 得证。

根据参考文献[15]中引理 3 和 Schur 补定理,

则 Φ'' 可化为

$$\Phi'' \leq \Phi''' + \varepsilon \alpha^T \alpha + \varepsilon^{-1} \alpha_1^T \alpha_1 + \alpha_2^T \alpha_2 + \alpha_3^T T_1 \alpha_3 + \alpha_4^T T_2 \alpha_4 \quad (19)$$

式中: $\alpha = [(PD)^T \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$

$$\alpha_1 = [E_{ai} \ \Phi_{28}'' \ 0 \ 0 \ 0 \ \Phi_{68}'' \ 0]$$

$$\alpha_2 = [C_i \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$\alpha_3 = [I \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$\alpha_4 = [0 \ K_j \ 0 \ 0 \ -K_j \ 0 \ 0]$$

$$\Phi''' = \begin{bmatrix} \Phi_{11}''' & \Phi_{12}''' & Q_3 & Q_4 & 0 & \Phi_{16}''' & PB_{1i} \\ * & \Phi_{22}''' & \Phi_{23}''' & \Phi_{24}''' & 0 & 0 & 0 \\ * & * & \Phi_{33}''' & M^T & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & \Phi_{44}''' & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & \Phi_{55}''' & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -V & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix}$$

其中, $\Phi_{11}''' = PA_i + A_i^T P + Q_1 - Q_3 - Q_4$, $\Phi_{12}''' = PB_i LK_j$, $\Phi_{16}''' = -PB_i LK_j$, $\Phi_{22}''' = \sigma V - 2Q_5 + M^T + M$, Φ_{23}''' , Φ_{24}''' , Φ_{33}''' , Φ_{44}''' , Φ_{55}''' 。

同式(18)中 Φ'' 对应下标取值。最后对(19)进行合同变换, 即两端分别乘对角阵 $\text{diag}\{P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}, P^{-1}, I, I, I, I, I\}$, 并令 $P^{-1} = X$, $Q_i^{-1} = R_i (i=1, 2, \dots, 5)$, $M^{-1} = R_6$ 及 $\Phi^{-1} = V$, $Y_j = K_j X$, 再做如下变换:

$$P^{-1} Q_i P^{-1} \geq 2P^{-1} - Q_i^{-1} = 2X - R_i (i=1, 2, \dots, 5)$$

$$P^{-1} \Phi P^{-1} \geq 2P^{-1} - \Phi^{-1} = 2X - V$$

$$P^{-1} M P^{-1} \geq 2P^{-1} - M^{-1} = 2X - R_6$$

即可得到矩阵不等式(11), $K_j = Y_j X^{-1}$ 和 $\Phi = V^{-1}$

分别为需设计的容错控制器和离散事件触发权矩阵。定理 1 证毕。

注 5 定理 1 的 LMIs 中同时包含了时延上下界 τ_1, τ_2 和事件触发参数 σ , 因此使 NNCFS (9) 具有鲁棒 H_∞ 保性能容错的充分条件是时滞/事件共同依赖的。另外, 依据定理 1 可以同时解得容错控制器增益与触发权矩阵, 故而 H_∞ 保性能容错与通讯设计是协同进行的。

注 6 在证明中采用了 Jensen 不等式的改进型互反凸组合技术, 上述技术一是具有更紧的积分上下界, 二是不会引入多的决策变量, 与采用自由权矩阵的方法相比, 对于 T-S 建模的系统会明显降低计算复杂度, 而且还可使结论具有较少的保守性。

注 7 当 $\sigma=0$ 时, 传输周期变为采样周期 h , 所有的采样数据均会通过网络传输, 定理 1 中 DETCS 下鲁棒 H_∞ 保性能容错与通讯的协同设计将退化为传统的 PTTCS 下单一鲁棒 H_∞ 保性能的容错设计, 这说明文中所述方法包含了 PTTCS 下 NCS 的容错设计, 也表现出本文方法更具普适性。

注 8 若已知时延的各种信息并给定 σ , 通过式(20) 对 γ 寻优, 还可求取使 NNCFS (9) 具有最小 γ 扰动抑制率的最优控制器和最优触发权矩阵。

$$\min_{\tau_1, \tau_2, h, \sigma} \gamma \text{ s.t. (12), } X > 0, V > 0 \\ R_i > 0 (i=1, 2, \dots, 6) \quad (20)$$

注 9 在限定了 γ 和 σ 后, 可通过式(21)对性能指标上界 J^* 寻优, 可求得使 J^* 最小的控制器与触发权矩阵。

$$\min J^* = \beta + \text{Trace}(\beta_1) + \text{Trace}(\beta_2) + \text{Trace}(\beta_3) + \text{Trace}(\beta_4) + \text{Trace}(\beta_5) \quad (21)$$

s.t. a. (12)

$$\text{b. } \begin{bmatrix} -\beta & x^T(0) \\ * & -X \end{bmatrix} < 0; \begin{bmatrix} -\beta_1 & \Gamma^T \\ * & -Q_1^{-1} \end{bmatrix} < 0; \\ \begin{bmatrix} -\beta_2 & \Gamma_1^T \\ * & -Q_2^{-1} \end{bmatrix} < 0; \begin{bmatrix} -\beta_3 & \Gamma_2^T \\ * & -Q_3^{-1} \end{bmatrix} < 0; \\ \begin{bmatrix} -\beta_4 & \Gamma_3^T \\ * & -Q_4^{-1} \end{bmatrix} < 0; \begin{bmatrix} -\beta_5 & \Gamma_4^T \\ * & -Q_5^{-1} \end{bmatrix} < 0$$

其中: $\int_{-\tau_1}^0 \mathbf{x}^T(s)\mathbf{x}(s)ds = \mathbf{F}^T \mathbf{F}$;

$$\int_{-\tau_2}^{-\tau_1} \mathbf{x}^T(s)\mathbf{x}(s)ds = \mathbf{F}_1^T \mathbf{F}_1;$$

$$\int_{-\tau_1}^0 \int_{\theta}^0 \tau_1 \dot{\mathbf{x}}^T(s)\dot{\mathbf{x}}(s)dsd\theta = \mathbf{F}_2^T \mathbf{F}_2;$$

$$\int_{-\tau_2}^0 \int_{\theta}^0 \tau_2 \dot{\mathbf{x}}^T(s)\dot{\mathbf{x}}(s)dsd\theta = \mathbf{F}_3^T \mathbf{F}_3;$$

$$\int_{-\tau_2}^{-\tau_1} \int_{\theta}^0 \tau_{21} \dot{\mathbf{x}}^T(s)\dot{\mathbf{x}}(s)dsd\theta = \mathbf{F}_4^T \mathbf{F}_4$$

$\mathbf{F}, \mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_3, \mathbf{F}_4$ 为适当的正定对称矩阵。

2.2 由定理 1 引出的一些推论

在定理 1 的基础上, 如果不确定 NNCFS 鲁棒容错与网络通讯的协同设计目标为: 寻求状态反馈增益阵 $\mathbf{K}_j$ 和离散事件触发权矩阵 Φ , 使得 NNCFS (9) 仅满足 3 个条件(同定理 1)中的部分条件, 则可分别得到如下推论:

推论 1 (仅满足条件 1, 鲁棒完整性与通讯协同设计) 在 DETCS 下, 给定正数 $\sigma \in [0, 1)$, τ_1, τ_2 , 若存在正定对称矩阵 $\mathbf{X}$, $\mathbf{V}$, 以及矩阵 $\mathbf{R}_i > 0$, ($i=1, 2, \dots, 6$), 使得对任意可能的执行器故障集 $\mathbf{L}$ 及可接受的参数不确定性, 满足如下矩阵不等式

$$\Phi_1 < 0 \quad (22)$$

式中, Φ_1 同式(11)。

则存在状态反馈控制律(8)使得不确定 NNCFS (9) 无扰时渐近稳定, 且控制器增益和事件触发权矩阵可通过 $\mathbf{K}_j = \mathbf{Y}_j \mathbf{X}^{-1}$ 和 $\Phi = \mathbf{V}^{-1}$ 求取。

推论 2 (仅满足条件 1 和条件 3, 鲁棒 H_∞ 容错与通讯协同设计) 在 DETCS 下, 给定常数 γ , 正数 $\sigma \in [0, 1)$, τ_1, τ_2 , 若存在正定对称矩阵 $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{V}$, 以及矩阵 $\mathbf{R}_i > 0$, ($i=1, 2, \dots, 6$), 使得对任意可能的执行器故障集 $\mathbf{L}$ 及可接受的参数不确定性, 满足如下矩阵不等式

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_1 & \Phi_2 \\ * & \Phi_3 \end{bmatrix} < 0 \quad (23)$$

其中, Φ_1 同式(11),

$$\Phi_2^T = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{li}^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{C}_i^T \mathbf{X} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Phi_3 = \begin{bmatrix} -\gamma^2 \mathbf{I} & 0 \\ * & -\mathbf{I} \end{bmatrix}.$$

则存在状态反馈控制律(8)使得不确定 NNCFS(9) 无扰时是渐近稳定的, 有扰时具有 γ 扰动抑制律, 且控制器增益和事件触发权矩阵可通过 $\mathbf{K}_j = \mathbf{Y}_j \mathbf{X}^{-1}$ 和 $\Phi = \mathbf{V}^{-1}$ 求取。

推论 3 (仅满足条件 1 和条件 2, 鲁棒性能容错与通讯协同设计) 在 DETCS 下, 给定常数 γ , 正数 $\sigma \in [0, 1)$, τ_1, τ_2 , 若存在正定对称矩阵 $\mathbf{X}$, $\mathbf{V}$, 以及矩阵 $\mathbf{R}_i > 0$, ($i=1, 2, \dots, 6$), 使得对任意可能的执行器故障集 $\mathbf{L}$ 及可接受的参数不确定性, 满足如下矩阵不等式

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_1 & \Phi_2 \\ * & \Phi_3 \end{bmatrix} < 0 \quad (24)$$

式中, Φ_1 同式(11),

$$\Phi_2^T = \begin{bmatrix} \mathbf{X} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{Y}_j & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{Y}_j & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Phi_3 = \begin{bmatrix} -\mathbf{T}_1^{-1} & 0 \\ * & -\mathbf{T}_2^{-1} \end{bmatrix}.$$

则存在状态反馈控制律(8), 使得不确定无扰 NNCFS(9)渐近稳定, 并具有一定的性能指标 J , 性能指标 J 存在上确界 J^* , 控制器增益和事件触发权矩阵可通过 $\mathbf{K}_j = \mathbf{Y}_j \mathbf{X}^{-1}$ 和 $\Phi = \mathbf{V}^{-1}$ 求取。

注 10 当 $\sigma=0$ 时, 通过上述推论亦可获得在 PPTCS 下 NNCS 不同鲁棒容错性能的设计依据。这同时也反映出本文方法具有良好的包容性和柔性。

3 仿真研究

3.1 结论的有效性验证

考虑文献[11]中的系统模型, 选取模糊隶属度函数为 $M_1(x_2) = \sin^2 x_2$ 和 $M_2(x_2) = \cos^2 x_2$ 。系统的模糊规则为

R^1 : if x_2 is M_1 , then

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A}_1 + \Delta \mathbf{A}_1)\mathbf{x}(t) + (\mathbf{B}_1 + \Delta \mathbf{B}_1)\mathbf{u}(t) + \mathbf{B}_{11}w(t)$$

R^2 : if x_2 is M_2 , then

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A}_2 + \Delta \mathbf{A}_2)\mathbf{x}(t) + (\mathbf{B}_2 + \Delta \mathbf{B}_2)\mathbf{u}(t) + \mathbf{B}_{12}w(t)$$

$$\text{式中: } A_1 = \begin{bmatrix} -3 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -0.5 \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}, B_{11} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}, B_{12} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$w(t) = \begin{cases} \cos(2 \times \pi \times t) \times \exp(-0.2 \times t) & (5 \leq t \leq 15) \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

矩阵 $\Delta A_i, \Delta B_i (i=1,2)$ 满足条件 $[\Delta A_i, \Delta B_i] =$

$$DF(t)[E_{ai}, E_{bi}], \quad \text{且 } D = \begin{bmatrix} 0.31 & 0.1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F(t) = \begin{bmatrix} \sin t & 0 \\ 0 & \cos t \end{bmatrix}, E_{ai} = E_{bi} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} (i=1,2).$$

针对执行器正常、执行器 1 完全失效、执行器 2 完全失效及执行器 1, 2 部分失效等故障分别取 $L_0 = \text{diag}\{1,1\}$, $L_1 = \text{diag}\{0,1\}$, $L_2 = \text{diag}\{1,0\}$ 和 $L_3 = \text{diag}\{0.8,0.5\}$ 来表示。

取系统初始状态 $x_0 = [2 \quad -2]^T$, 采样周期 $h=0.1s$, 时延上下界分别为 $\tau_1=0.01s$, $\tau_2=0.25s$, 触发参数 $\sigma=0.8$, 限定 $\gamma=0.9$ 。

为比较定理 1 和推论 2 所得控制器与触发权矩阵引起的系统性能的差异, 通过求解不同的 LMIs 可分别求得鲁棒 H_∞ 保性能容错及鲁棒 H_∞ 完整性的控制器增益和事件触发权矩阵如下

$$K_{11} = \begin{bmatrix} -0.0291 & 0.0044 \\ -0.0054 & -0.0349 \end{bmatrix}$$

$$K_{12} = \begin{bmatrix} -0.0301 & 0.0078 \\ -0.0053 & -0.0351 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} 10.0246 & 17.9680 \\ 17.9680 & 35.7151 \end{bmatrix}$$

$$K_{21} = \begin{bmatrix} -0.0344 & 0.0168 \\ 0.0037 & -0.0301 \end{bmatrix}$$

$$K_{22} = \begin{bmatrix} -0.0351 & 0.0217 \\ 0.0044 & -0.0299 \end{bmatrix}$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} 29.5265 & 50.0421 \\ 50.0421 & 87.6093 \end{bmatrix}$$

对于定理 1 设计的控制器与触发权矩阵, 状态分量 x_1, x_2 的响应曲线分别如图 2~3 所示。

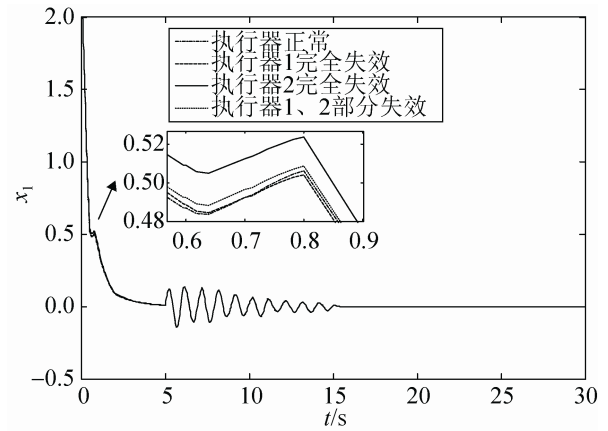


图 2 闭环系统状态 x_1 响应曲线

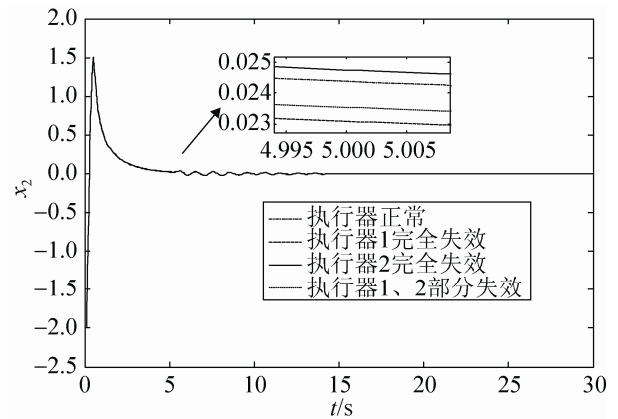


图 3 闭环系统状态 x_2 响应曲线

对于推论 2 设计的控制器与触发权矩阵, 状态分量 x_1, x_2 的响应曲线分别如图 4~5 所示。

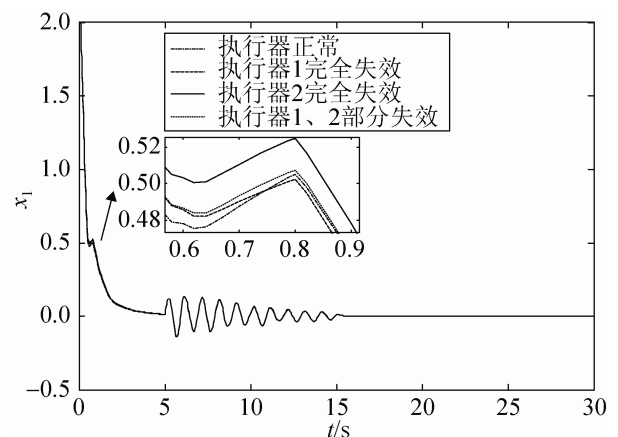
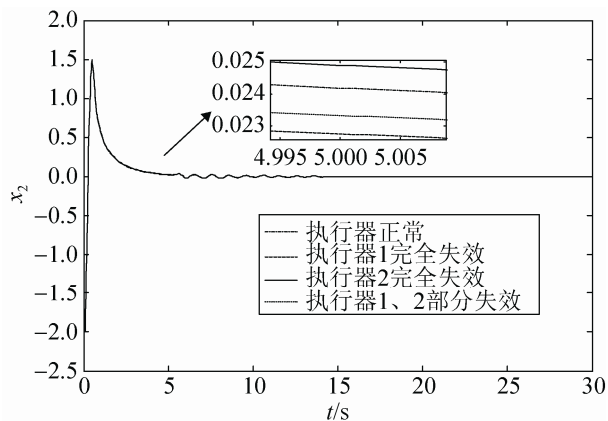


图 4 闭环系统状态 x_1 响应曲线

图 5 闭环系统状态 x_2 响应曲线

由仿真图 2~3 和 4~5 可以看出, 引入 DETCS 后, 在执行器发生失效故障时, 系统不仅渐近稳定, 而且还能有效抑制外部扰动。将图 2 与 4、图 3 与 5 进一步进行比较, 还可以看出基于定理 1 设计的控制器使系统有效抑制扰动的同时, 又具备了更好的动态性能, 原因是定理 1 较推论 2 增加了保性能的约束。由此不难得出采用本文方法可以灵便地依据不同的约束条件进行鲁棒完整性、鲁棒 H_∞ 完整性以及鲁棒 H_∞ 保性能容错等性能与通讯之间的多种类多目标协同设计, 从而依据不同需求提升设计的满意度。

3.2 触发参数对系统性能及通讯资源占用的影响分析

当 $\sigma = 0.8$ 不变时, 取 30 s 仿真时段, 得到 DETCS 下 NNCFs 的数据传输时刻与时间间隔如图 6 所示。

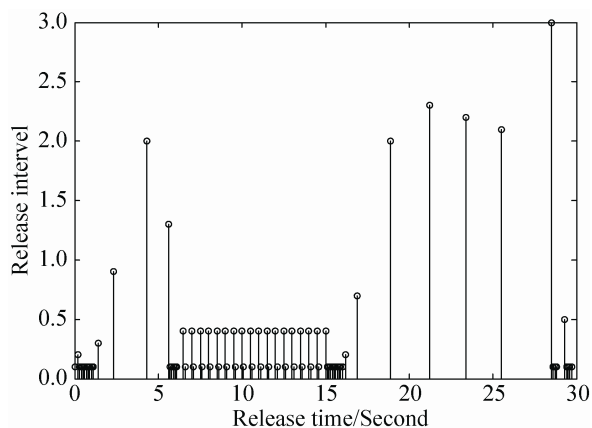


图 6 DETCS 下 NNCFs 的传输时刻与时间间隔

由图 6 可以看出: 在 DETCS 下, 系统达到稳态后仅有少量数据传输, 如若出现扰动则传输数据量增加, 以使系统有效抵御扰动的影响尽快恢复到平衡状态。在 30 s 仿真时间段内, DETCS 下传输的数据仅为传统的 PTTCS 下的 37%, 因此该机制可有效地节约网络通讯资源, 缓解网络通讯压力。

为了更加明显的看到不同的触发参数 σ 对系统性能的影响, 仍取 30 s 的仿真时段, 系统的平均发送周期 $\bar{h}$, 实际传输的数据量 n 以及数据传输率 $\gamma_{e/t}$ 如表 1 所示。

表 1 不同触发参数下系统性能比较

σ	n	$\bar{h}$	$\gamma_{e/t}$
0	300	0.1	100%
0.2	287	0.11	95%
0.4	207	0.15	69%
0.6	133	0.22	44%
0.8	110	0.27	37%

由表 1 易知, 如若采样周期 h 固定, 实际传输数据 n 与触发参数 σ 成反比。这也正应验了注 2 中数据传输与否会依据系统控制需求而定的论述, 也进一步揭示出控制量中引入状态误差 $e(i_k h)$ 后, 的确将 NNCS 容错控制与通讯联系在了一起, 使二者的协同设计成为现实。但在实际应用中, σ 的增大意味着允许的系统动态波动会增大也即性能变差, 因此 σ 的选择应根据实际需求考虑系统性能与网络资源节约之间的折衷平衡。

4 结论

本文针对存在时变时延、执行器故障、参数扰动和有限能量扰动的 NNCS, 对 DETCS 与容错控制的协同设计进行了研究。首先基于 DETCS, 采用状态反馈控制策略, 建立了闭环故障系统模型; 然后推证出了系统具有鲁棒 H_∞ 保性能容错的时滞/事件依赖充分条件, 并给出控制器与事件触发矩阵协同优化求解的方法; 进而在此基础上, 得到几种不同目标约束下的容错控制与事件触发通讯的协同设计依据; 最终实现了系统性能与网络服

务质量的相互兼顾与协调。由于工程中现代控制系统的网络化程度已越来越高, 受控对象的非线性特性广为存在, 因此实际中只要将相应的非线性物理对象建模为文中的 T-S 模糊模型, 在智能传感器中对事件触发条件进行相应的编程, 便可使用文中的方法进行容错与通讯的协同设计。

参考文献:

- [1] Xiu-zhi Liu, Ya-ping Dai, Long Gao. Fault-tolerant control of networked control systems with time-varying delay [J]. International Conference on Control and Automation (S1948-3449), 2013, 10: 750-754.
- [2] J P Hespanha, P Naghshtabrizi. A survey of recent results in networked control systems [J]. IEEE, January (S0018-9219), 2007, 95(1): 138-162.
- [3] Chen Peng, Tai Cheng Yang. Communication Delay Distribution Dependent Networked Control for a Class of T-S Fuzzy Systems[J]. Fuzzy Systems, IEEE Transactions on (S1063-6706), 2010, 18(2): 326-335.
- [4] Walsh G C, Ye H, Bushnell L. Stability analysis of networked control systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology (S1063-6536), 2002, 10(3): 438-446.
- [5] Youmin Zhang, Jin Jiang. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems[J]. Annual Reviews in Control (S1367-5788), 2008, 32(2): 229-252.
- [6] 周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术 [J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 748-758.
- [7] 郑英, 方华京. 不确定网络化控制系统的鲁棒容错控制[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(8): 804-807.
- [8] 谢德晓, 张登峰, 韩笑冬, 王执铨. 执行器故障情况下的网络控制系统 H_∞ 容错控制 [J]. 华中科技大学学报, 2009, 37(1): 18-22.
- [9] 李炜, 王艳飞. 一种少保守性的 NCS 鲁棒 H_∞ 保性能容错控制 [J]. 控制与决策, 2011, 26(12): 1768-1776.
- [10] 王君, 李炜, 李战明. 基于 T-S 模型的不确定非线性 NCS 鲁棒容错保性能设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(10): 2288-2294.
- [11] 王君, 李炜, 李战明. 不确定非线性 NCS 鲁棒 H_∞ 保性能容错设计 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(9): 72-77.
- [12] Feng J, Wang S Q. Reliable Fuzzy Control for a Class of Nonlinear Networked Control Systems with Time Delay [J]. Acta Automatica Sinica(S0254-4156), 2012, 38(7): 1091-1099.
- [13] Chen Peng, Qing Long Han, Dong Yue. To transmit or not to transmit a discrete event-triggered communication scheme for networked Takagi-Sugeno fuzzy systems [J]. Fuzzy Systems, IEEE Transactions on(S1063-6706), 2013, 21(1): 1-6.
- [14] Songlin Hu, Dong Yue. Event-triggered control design of linear networked systems with quantizations [J]. ISA Transactions(S0019-0578), 2012, 51(1): 153-162.
- [15] 李炜, 赵莉, 蒋栋年, 等. 基于事件触发的 NCS 鲁棒完整性设计 [J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(1): 74-79.
- [16] 张建华, 蔚芳, 谢孟丽, 等. 电网电压不对称时基于预测电流的双馈风电系统优化控制 [J]. 电网技术, 2012, 36(12): 228-235.
- [17] 赵新, 金新民, 周飞, 等. 基于比例积分-降阶谐振调节器的并网逆变器不平衡控制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 84-92.
- [18] 贺益康, 徐海亮. 双馈风电机组电网适应性问题及其谐振控制解决方案 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5188-5203.
- [19] 张平化, 李铁才, 杨贵杰. 三相电压型 PWM 整流器四象限运行系统仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(6): 1278-1283. (Zhang Pinghua, Li Tiecai, Yang Guijie. Analysis and simulation of four-quadrant operation for three-phase PWM VSR [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2011, 23(6): 1278-1283.)
- [20] Yongsug Suh, Thomas A Lipo. Control scheme in hybrid synchronous stationary frame for PWM AC/DC converter under generalized unbalanced operating conditions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications (S0093-9994), 2006, 42(3): 825-835.
- [21] Bo Yin, Ramesh Oruganti, Sanjib Kumar Panda, et al. An output-power-control strategy for a three-phase PWM rectifier under unbalanced supply conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2008, 55(5): 2140-2151.
- [22] 徐金榜, 何顶新, 赵金, 等. 电压不平衡情况下 PWM 整流器功率分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 80-85.

(上接第 1139 页)