第 40 卷第 5 期
2023 年 5 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 40 No. 5
May 2023

Markov跳变系统的非同步事件触发耗散容错控制

陈惠英[1], 刘仁伟[1], 夏卫锋[1], 李祖欣[2†]

(1. 湖州师范学院 工学院, 浙江 湖州 313000; 2. 湖州学院 智能制造学院, 浙江 湖州 313000)

摘要: 本文主要研究一类具有执行器故障的Markov跳变系统的非同步事件触发耗散容错控制问题. 通过引入非同步事件触发器来降低传感器的采样数据传输频率, 从而降低通信消耗. 采用两个独立的隐Markov模型分别描述触发器、控制器与原系统之间的非同步现象. 在此框架下, 基于Lyapunov稳定性和耗散理论, 得到了闭环控制系统在执行器存在故障的情况下随机稳定并严格耗散的充分条件. 并借助矩阵不等式变换技术给出了触发器和控制器矩阵参数的求解方法, 实现了触发器和控制器的协同设计. 最后, 通过仿真研究验证了所提出的设计方法的有效性.

关键词: Markov跳变系统; 非同步事件触发; 非同步控制; 隐Markov模型

引用格式: 陈惠英, 刘仁伟, 夏卫锋, 等. Markov跳变系统的非同步事件触发耗散容错控制. 控制理论与应用, 2023, 40(5): 874 – 882

DOI: 10.7641/CTA.2021.10939

Asynchronous event-triggered dissipative fault-tolerant control for Markov jump systems

CHEN Hui-ying[1], LIU Ren-wei[1], XIA Wei-feng[1], LI Zu-xin[2†]

(1. School of Engineering, Huzhou University, Huzhou Zhejiang 313000, China;
2. School of Intelligent Manufacturing, Huzhou College, Huzhou Zhejiang 313000, China)

Abstract: This paper mainly studies the problem of asynchronous event-triggered dissipative fault-tolerant control for a class of Markov jump systems with actuator failures. An asynchronous event-trigger is introduced to reduce the sampling-data transmission frequency of the sensor, and thus reduce the communication consumption. Two independent hidden Markov models are used to describe the asynchronization between the trigger, the controller and the original system, respectively. Under this framework, based on the Lyapunov stability and dissipativity theory, the sufficient condition for stochastic stability and strict dissipativity of the closed-loop system in the case of actuator failures is obtained. With the help of matrix inequality transformation techniques, the solving approach of matrix parameters of the trigger and the controller is given, and the collaborative design of the trigger and the controller is realized. Finally, the effectiveness of the design method proposed in this paper is verified by simulation.

Key words: Markov jump systems; asynchronous event-triggered; asynchronous control; hidden Markov model

Citation: CHEN Huiying, LIU Renwei, XIA Weifeng, et al. Asynchronous event-triggered dissipative fault-tolerant control for Markov jump systems. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(5): 874 – 882

1 引言

Markov跳变系统(Markov jump systems, MJSs)是由多个子系统或模态构成的一类特殊的混杂系统, 因其具有对实际系统强大的建模能力, 在许多领域中得到了广泛应用, 如: 电力系统、通信系统、航空航天和经济系统等[1–4]. 有关MJSs的滤波和控制问题一直以来都是国内外学者们研究的热点, 并取得了丰富的研究成果[5–8]. 特别地, 在实际控制系统中, 由于外部环境变化、信号或元器件的突变等因素使得系统故障发生不可避免. 因此, 为提高系统的可靠性和安全性, 近年来故障诊断和容错控制受到了越来越多学者的关注和研究. 文献[9]针对一类具有执行器故障和时滞的(Takagi-Sugeno, T–S)模糊MJSs, 设计了基于耗散性的可靠控制器, 通过引入松弛矩阵来消除系统矩阵

收稿日期: 2021–10–01; 录用日期: 2021–12–30.
†通信作者. E-mail: lzx@zjhu.edu.cn.
本文责任编委: 俞立.
国家自然科学基金项目(61603133), 浙江省公益技术应用研究计划项目(LGG21E020001, LGG22F030023), 2020年度高等学校国内访问学者“教师专业发展项目”(FX2020046)资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China (61603133), the Zhejiang Provincial Public Welfare Technology Application Research Project of China (LGG21E020001, LGG22F030023) and the Teacher Professional Development Project of Domestic Visiting Scholars in Colleges and Universities of China in 2020 (FX2020046).

与Lyapunov矩阵之间的耦合. 文献[10]研究了存在系统和耦合参数跳变, 以及控制信息不完全和欺骗攻击的离散MJSs的同步控制设计方法. 文献[11]分析了具有执行器故障的T–S模糊半MJSs的广义耗散控制问题, 通过构造一种改进的增广Lyapunov-Krasovskii泛函得到了一个保守性相对较小的充分条件. 文献[12]针对具有执行器故障的Markov跳变非线性系统, 通过设计自适应滑模控制器来克服执行器故障、非线性项和外部干扰等影响.

注意到上述文献都是基于传统的周期触发方式来实现信号采集与传输的, 虽然这种方式便于分析和实现, 但若数据更新过快加上带宽受限的情况下很容易造成网络拥塞和数据丢包等问题. 此外, 由于是按固定周期运行, 特别是当系统误差很小时会造成资源的浪费. 针对这些问题, 近年来, 事件触发方法引起了越来越多国内外学者们的兴趣和关注. 事件触发方法通过设定事件触发条件来降低数据的传输频率, 节点信息的传输按预先设定的条件来决定是否执行, 从而降低网络通信量和能耗. 近年来, 基于事件触发的MJSs研究也取得了不少研究成果. 文献[13]研究了时滞MJSs的事件触发耗散滤波问题, 利用Lyapunov和Wirtinger不等式技术, 给出了误差系统具有严格耗散性的随机稳定条件以及事件触发矩阵和滤波器参数的联合设计方案. 文献[14]研究了转移概率部分未知和执行器饱和条件下MJSs的事件触发控制器设计方法, 给出了避免Zeno行为的随机镇定条件以及两个连续事件之间的事件间隔时间下界. 文献[15]探讨了基于事件触发的MJSs的可靠耗散控制问题, 给出了使闭环系统在执行器故障的情况下随机稳定并满足耗散特性的充分条件, 同时还采用了新的积分不等式来降低结果的保守性. 另外, 文献[16]研究了具有时变时延的半Markov跳变神经网络系统的动态事件触发同步控制问题. 文献[17]讨论了基于网络的不确定MJSs在拒绝服务攻击下的事件触发H_∞控制问题.

需要指出的是, 上述文献以及现有的许多工作中, 都是假设控制器/滤波器与原系统之间是模态同步的[18–20], 这意味着控制器/滤波器需要实时精确地获取系统模态信息, 但在实际系统中时延、丢包等现象不可避免, 所以同步条件在实际系统中很难真正实现. 为了克服这一困难, 一个简单的处理方法是考虑控制器/滤波器是模态无关的[21–22], 该方法虽然结构简单, 实现容易, 但它忽略了原系统的模态信息, 会带来较大的保守性. 由于认识到这些假设的不合理性, 近年来, 学者们越来越重视对非同步问题的研究. 现有的非同步建模方法主要有: 时滞模型[23]、分段齐次Markov链模型[24]和隐Markov模型(hidden Markov model, HMM)[25–26]. 文献[27–30]主要研究了事件触发条件下的MJSs的非同步控制问题. 其中, 文献[27]研究了一类具有分布时滞和信道衰减的离散时间Markov跳变神经网络系统的事件触发非同步保成本控制问题, 采用了分段齐次Markov链模型来描述控制器与原系统的非同步现象, 但文中的事件触发条件假定不受原系统跳变模态的影响. 基于HMM非同步模型, 文献[28–30]分别研究了中立型广义MJSs的非同步H_∞控制、随机网络攻击下的广义MJSs的非同步无源控制, 以及具有转移概率未知和非均匀采样的T–S模糊MJSs的模糊非同步耗散控制问题, 但文中所考虑的事件触发器模态与原系统模态均是同步的. 上述文献中虽然考虑了非同步现象, 但都仅考虑了控制器与原系统之间的非同步关系, 并没有考虑事件触发器的非同步问题, 因此不能很好地描述实际现象. 考虑到目前关于MJSs的事件触发非同步控制的研究还很少, 尤其是同时还考虑事件触发器的非同步现象的研究更是未见报道, 这促使笔者开展这方面的研究工作.

本文主要研究非同步事件触发机制下一类具有执行器故障的离散MJSs的非同步耗散容错控制问题. 考虑到实际系统中存在带宽受限及非同步等现象, 通过引入事件触发调度机制来降低通信消耗; 触发器、控制器与原系统之间的非同步关系由两个独立的HMM描述. 在此框架下, 结合Lyapunov稳定性和耗散理论, 得到闭环系统在执行器存在故障情况下随机稳定并严格$(\mathcal{U},\mathcal{S},\mathcal{V})$–$\gamma$–耗散的充分条件. 并借助矩阵不等式缩放、引入松弛矩阵等技术, 将复杂的非线性控制问题转化为基于线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)的线性控制问题, 从而可以方便地求解触发器和控制器矩阵参数, 实现触发器和控制器的协同设计. 论文的主要贡献有: 1) 不同于现有的MJSs的事件触发控制, 更多的是基于同步控制或模态无关的情况[14–17]. 而本文不仅考虑了控制器的非同步特性, 同时还考虑了事件触发器的非同步特性, 分别由两个独立的HMMs描述, 相比之下更符合实际系统情况; 2) 本文所提出的非同步事件触发耗散容错控制设计方法更具一般性, 基于HMM的非同步模型涵盖了模态同步和模态无关两种特殊情况; 同时, 所研究的耗散控制问题也包含了H_∞控制和无源控制; 且所涉及的事件触发和容错控制也很容易推广至周期触发和无执行器故障情形.

2 问题描述

考虑如下的离散Markov跳变对象模型:

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_{\alpha_k}x_k + B_{1\alpha_k}u_{fk} + B_{2\alpha_k}w_k, \\ z_k = C_{\alpha_k}x_k + D_{1\alpha_k}u_{fk} + D_{2\alpha_k}w_k, \end{cases} \tag{1}$$

其中: $x_k\in\mathbb{R}^{n_x}$为系统状态, $z_k\in\mathbb{R}^{n_z}$为被控输出, $u_{fk}\in\mathbb{R}^{n_u}$为有故障时的控制输入, $w_k\in\mathbb{R}^{n_w}$为外界扰动输入且$w_k\in l_2[0,\infty)$. 系统的模态参数$\alpha_k(\alpha_k\in\mathbb{N}=\{1,2,\cdots,n\})$描述其Markov跳变过程, 并服从转移

概率矩阵(transition probability matrix, TPM) $\varPhi=[\partial_{pq}]$, 其中转移概率∂_{pq}定义为

$$\Pr\{\alpha_{k+1}=q|\alpha_k=p\}=\partial_{pq},\tag{2}$$

显然, $\forall p,q\in\mathbb{N},\ \partial_{pq}\in[0,1],\ \sum\limits_{q=1}^{n}\partial_{pq}=1.$

考虑到网络控制系统中带宽受限, 本文将在传感器与控制器之间引入一个事件触发器用于决定当前的采样数据是否需要传输给控制器, 从而减少数据传输的频率. 同时考虑到原系统的模态不能直接获得的情况, 本文基于HMM原理建立一个非同步事件触发器. 其触发机制为: 若当前系统状态x_k与上次传输的状态x_{t_k}满足

$$(x_{t_k}-x_k)^{\mathrm T}R_{\theta_k}(x_{t_k}-x_k)\leqslant\lambda_{\theta_k}x_k^{\mathrm T}R_{\theta_k}x_k,\tag{3}$$

则x_k不予传输, 否则传输x_k至控制器. 其中, 触发器阈值参数$\lambda_{\theta_k}>0$, R_{θ_k}为待设计的正定加权矩阵. 模态参数$\theta_k\in\mathbb{N}$是用来观测系统模态α_k跳变的随机变量, 服从条件转移概率矩阵(conditional probability matrix, CPM)$\varTheta=[\vartheta_{pi}]$, 其条件概率$\vartheta_{pi}$为

$$\Pr\{\theta_k=i|\alpha_k=p\}=\vartheta_{pi},\tag{4}$$

其中: 对于$\forall p,i\in\mathbb{N},\vartheta_{pi}\in[0,1],\sum\limits_{i=1}^{n}\vartheta_{pi}=1$. CPM$\varTheta$反映了事件触发器模态与原对象模态之间的非同步程度.

利用零阶保持器, 控制器可接收到触发器信号$\tilde x_k$, 满足

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

定义传输误差

$$e_k=\tilde x_k-x_k,\tag{5}$$

根据式(3)可推得

$$e_k^{\mathrm T}R_{\theta_k}e_k\leqslant\lambda_{\theta_k}x_k^{\mathrm T}R_{\theta_k}x_k.\tag{6}$$

注 1 根据事件触发机制(3), 触发器的传输时刻$\{t_0,t_1,t_2,\cdots\}$隶属于采样时刻$\{0,1,2,\cdots\}$, 采样数据不再是每个采样时刻都进行传输, 从而有效减少了数据传输的频率. 特别地, 当$\lambda_{\theta_k}=0$时, 式(3)便退化为周期触发. 另外值得指出的是, 现有的有关事件触发的MJSs的研究基本都是假设事件触发器是模态无关或模态同步的, 如文献[27–30]. 模态独立的假设忽略了可用的模态信息从而导致结果具有较大的保守性; 而模态同步假设又过于理想, 不能很好地描述实际现象. 为此, 本文采用HMM来表示事件触发器和原系统的模态非同步问题, 其中触发器模态通过观测原系统模态获得, 与文献[24,27]中的分段齐次Markov链模型不同, HMM仅依赖原系统当前的模态. 此外, 基于HMM的非同步事件触发模型更具一般性, 它涵盖了模态无关(即$\theta_k\in\{1\}$)和模态同步(即$\varTheta=I$)两种特殊情况.

同时, 基于HMM原理, 设计如下的非同步控制器:

$$u_k=K_{\rho_k}\tilde x_k,\tag{7}$$

其中: K_{ρ_k}为待求控制器增益矩阵, 模态参数$\rho_k\in\mathbb{N}$表示隐Markov跳变过程的随机变量, 且服从CPM $\varPi=[\pi_{pj}]$, 其条件概率π_{pj}为

$$\Pr\{\rho_k=j|\alpha_k=p\}=\pi_{pj},\tag{8}$$

其中: $\forall p,j\in\mathbb{N},\pi_{pj}\in[0,1],\sum\limits_{j=1}^{n}\pi_{pj}=1$. 与非同步触发器类似, 在HMM方案下的非同步控制器更具一般性.

注 2 在本文中事件触发器和控制器与原对象之间的非同步现象分别采用了两个不同的HMMs($\alpha_k,\theta_k,\varPhi,\varTheta$)和($\alpha_k,\rho_k,\varPhi,\varPi$)来描述. 不失一般性, 本文假设$\alpha_k,\theta_k$和$\rho_k$隶属于同一个有限集合$\mathbb{N}$, 需要指出的是, 可以将本文的结论很容易推广到3个模态分别隶属于不同集合的情况. 同时, 为了书写简便, 在下文中将$\alpha_k,\alpha_{k+1},\theta_k$和$\rho_k$简写为$p,q,i$和$j$.

另外, 本文考虑到执行器故障可能会随机出现, 即

$$u_{fsk}=a_{sk}u_{sk},\ 0\leqslant\underline{a}_s\leqslant a_{sk}\leqslant\bar a_s\leqslant1,\tag{9}$$

其中: u_{sk}和$u_{fsk}(s=\{1,2,\cdots,n_u\})$分别表示第$s$个执行器的输入和输出信号; a_{sk}是未知的, 表示第s个执行器的故障程度; $\underline{a}_s,\bar a_s$为给定的a_{sk}下限和上限. 当$\underline{a}_s=\bar a_s=0$时, 表示第$s$个执行器发生完全故障; 当$0<\underline{a}_s<\bar a_s<1$时, 表示第$s$个执行器出现部分故障, 而当$\underline{a}_s=\bar a_s=1$时, 表示故障未发生.

因此, 整个故障模型可以表示为

$$u_{fk}=M_ku_k,\tag{10}$$

其中$M_k=\mathrm{diag}\{a_{1k},a_{2k},\cdots,a_{n_uk}\}$.

定义

$$M_1=\mathrm{diag}\{\frac{\underline{a}_1+\bar a_1}{2},\frac{\underline{a}_2+\bar a_2}{2},\cdots,\frac{\underline{a}_{n_u}+\bar a_{n_u}}{2}\},$$
$$M_2=\mathrm{diag}\{\frac{\bar a_1-\underline{a}_1}{2},\frac{\bar a_2-\underline{a}_2}{2},\cdots,\frac{\bar a_{n_u}-\underline{a}_{n_u}}{2}\},$$

则M_k可重新表示为

$$M_k=M_1+\varLambda_k,\tag{11}$$

其中: $\varLambda_k=\mathrm{diag}\{\delta_{1k},\delta_{2k},\cdots,\delta_{n_uk}\}$, 且$|\delta_{sk}|\leqslant\dfrac{\bar a_s-\underline{a}_s}{2}$.

结合式(1)(5)(7)和式(10), 可得如下的闭环控制系统:

$$\begin{cases}x_{k+1}=\bar A_{pjk}x_k+\bar B_{1pjk}e_k+B_{2p}w_k,\\ z_k=\bar C_{pjk}x_k+\bar D_{1pjk}e_k+D_{2p}w_k,\end{cases}\tag{12}$$

其中:

$$\bar A_{pjk}=A_p+B_{1p}M_kK_j,\ \bar B_{1pjk}=B_{1p}M_kK_j,$$
$$\bar C_{pjk}=C_p+D_{1p}M_kK_j,\ \bar D_{1pjk}=D_{1p}M_kK_j.$$

为推动工作的进展, 下面将引入一些必要的定义.

定义 1[31] 闭环控制系统(12)被称作是随机稳定的, 若当$w_k\equiv 0$时, 在任意初始条件(x_0,α_0)下, 满足如下条件:

$$\mathrm{E}\{\sum_{k=0}^{\infty}\|x_k\|^2|x_0,\alpha_0\}<\infty. \tag{13}$$

定义 2[32] 给定标量$\gamma>0$和矩阵($\mathcal{U}\leqslant 0,\mathcal{S},\mathcal{V}^{\mathrm{T}}=\mathcal{V}$), 闭环控制系统(12)被称作是严格$(\mathcal{U},\mathcal{S},\mathcal{V})$–$\gamma$–耗散的, 若当$w_k\in l_2[0,\infty)$时, 对于任意正整数$N$, 在零初始条件下, 满足如下条件:

$$\sum_{k=0}^{N}\mathrm{E}\{F(z_k,w_k)\}\geqslant\gamma\sum_{k=0}^{N}w_k^{\mathrm{T}}w_k, \tag{14}$$

其中:

$$F(z_k,w_k)=z_k^{\mathrm{T}}\mathcal{U}z_k+2z_k^{\mathrm{T}}\mathcal{S}w_k+w_k^{\mathrm{T}}\mathcal{V}w_k,$$

γ表示耗散性能指标, γ值越大代表耗散性越好. 并进一步定义$\mathcal{U}\triangleq-\mathcal{U}_1^{\mathrm{T}}\mathcal{U}_1$.

注 3 值得指出的是, 耗散问题涵盖了两种特殊性能, 即

1) H_∞性能: 可令式(14)中的$\mathcal{U}=-I,\mathcal{S}=0,\mathcal{V}=(\gamma^2+\gamma)I$.

2) 无源性能: 当$\mathbb{R}^{n_z}=\mathbb{R}^{n_w}$时, 可令式(14)中的$\mathcal{U}=0$, $\mathcal{S}=I,\mathcal{V}=2\gamma I$.

本文的主要目标是基于HMM的非同步框架, 为系统(1)在执行器存在随机故障的情况下, 设计一个可行的事件触发器(3)和状态反馈控制器(7), 使得闭环控制系统(12)随机稳定并严格$(\mathcal{U},\mathcal{S},\mathcal{V})$–$\gamma$–耗散.

3 系统稳定性和耗散性分析

本节将分析闭环控制系统(12)的随机稳定性和耗散性能, 并将在下面的定理1中给出其充分条件.

定理 1 对于给定矩阵($\mathcal{U}\leqslant 0,\mathcal{S},\mathcal{V}^{\mathrm{T}}=\mathcal{V}$)和标量$\lambda_i$, 闭环控制系统(12)是随机稳定且是严格$(\mathcal{U},\mathcal{S},\mathcal{V})$–$\gamma$–耗散的, 若存在矩阵$K_j\in\mathbb{R}^{n_u\times n_x}$, 正定矩阵$P_p\in\mathbb{R}^{n_x\times n_x}$, $G_{pij}\in\mathbb{R}^{n_x\times n_x}$, $R_i\in\mathbb{R}^{n_x\times n_x}$, 以及正定对角矩阵$W_{pij}\in\mathbb{R}^{n_u\times n_u}$, 对于$\forall p,i,j\in\mathbb{N}$, 满足如下条件:

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\vartheta_{pi}\pi_{pj}G_{pij}<P_p, \tag{15}$$

$$\begin{bmatrix}\Xi_{pij} & \mathscr{X}_j^{\mathrm{T}} & \mathscr{Y}_pM_2W_{pij}\\ * & -W_{pij} & 0\\ * & * & -W_{pij}\end{bmatrix}<0, \tag{16}$$

其中:

$$\Xi_{pij}=\begin{bmatrix}-\bar{P}_p^{-1} & 0 & \bar{A}_{pj}^* & \bar{B}_{1pj}^* & B_{2p}\\ * & -I & \mathcal{U}_1\bar{C}_{pj}^* & \mathcal{U}_1\bar{D}_{1pj}^* & \mathcal{U}_1D_{2p}\\ * & * & \varGamma_{pij} & 0 & -(\bar{C}_{pj}^*)^{\mathrm{T}}\mathcal{S}\\ * & * & * & -R_i & -(\bar{D}_{1pj}^*)^{\mathrm{T}}\mathcal{S}\\ * & * & * & * & \varPsi_p\end{bmatrix},$$

$\bar{A}_{pj}^*=A_p+B_{1p}M_1K_j,\ \bar{B}_{1pj}^*=B_{1p}M_1K_j$,
$\bar{C}_{pj}^*=C_p+D_{1p}M_1K_j,\ \bar{D}_{1pj}^*=D_{1p}M_1K_j$,
$\mathscr{X}_j=[0\ \ 0\ \ K_j\ \ K_j\ \ 0]$,
$\mathscr{Y}_p=[B_{1p}^{\mathrm{T}}\ \ D_{1p}^{\mathrm{T}}\mathcal{U}_1^{\mathrm{T}}\ \ 0\ \ 0\ \ -D_{1p}^{\mathrm{T}}\mathcal{S}]^{\mathrm{T}}$,
$\bar{P}_p=\sum_{q=1}^{n}\partial_{pq}P_q,\ \mathrm{He}(X)=X+X^{\mathrm{T}}$,
$\varGamma_{pij}=-G_{pij}+\lambda_iR_i,\ \varPsi_p=-\mathrm{He}(D_{2p}^{\mathrm{T}}\mathcal{S})-\mathcal{V}+\gamma I$.

证 首先, 对式(16)使用Schur补可得

$$\Xi_{pij}+\mathscr{X}_j^{\mathrm{T}}W_{pij}^{-1}\mathscr{X}_j+\mathscr{Y}_pM_2W_{pij}M_2\mathscr{Y}_p^{\mathrm{T}}<0, \tag{17}$$

根据文献[33]中的引理1可得

$$\Xi_{pij}+\mathscr{X}_j^{\mathrm{T}}\varLambda_k\mathscr{Y}_p^{\mathrm{T}}+\mathscr{Y}_p\varLambda_k\mathscr{X}_j<0, \tag{18}$$

由此可得

$$\begin{bmatrix}-\bar{P}_p^{-1} & 0 & \bar{A}_{pjk} & \bar{B}_{1pjk} & B_{2p}\\ * & -I & \mathcal{U}_1\bar{C}_{pjk} & \mathcal{U}_1\bar{D}_{1pjk} & \mathcal{U}_1D_{2p}\\ * & * & \varGamma_{pij} & 0 & -(\bar{C}_{pjk})^{\mathrm{T}}\mathcal{S}\\ * & * & * & -R_i & -(\bar{D}_{1pjk})^{\mathrm{T}}\mathcal{S}\\ * & * & * & * & \varPsi_p\end{bmatrix}<0. \tag{19}$$

接着, 对式(19)使用Schur补, 容易得到

$$\Xi_{pij}^1\triangleq\mathscr{A}_{pi}-\mathscr{D}_{pj}^{\mathrm{T}}\mathscr{C}_p\mathscr{D}_{pj}<\hat{G}_{pij}, \tag{20}$$

$$\Xi_{pij}^2\triangleq\mathscr{B}_i+\mathscr{E}_{pj}^{\mathrm{T}}\bar{P}_p\mathscr{E}_{pj}<\tilde{G}_{pij}, \tag{21}$$

其中:

$$\mathscr{A}_{pi}=\begin{bmatrix}\lambda_iR_i & 0 & -(\bar{C}_{pjk})^{\mathrm{T}}\mathcal{S}\\ * & -R_i & -(\bar{D}_{1pjk})^{\mathrm{T}}\mathcal{S}\\ * & * & \varPsi_p\end{bmatrix},$$

$$\mathscr{D}_{pj}=\begin{bmatrix}\bar{A}_{pjk} & \bar{B}_{1pjk} & B_{2p}\\ \mathcal{U}_1\bar{C}_{pjk} & \mathcal{U}_1\bar{D}_{1pjk} & \mathcal{U}_1D_{2p}\end{bmatrix},$$

$\mathscr{C}_p=\mathrm{diag}\{-\bar{P}_p,-I\},\ \mathscr{B}_i=\mathrm{diag}\{\lambda_iR_i,-R_i\}$,
$\mathscr{E}_{pj}=[\bar{A}_{pjk}\ \ \bar{B}_{1pjk}],\ \tilde{G}_{pij}=\mathrm{diag}\{G_{pij},0\}$,
$\hat{G}_{pij}=\mathrm{diag}\{G_{pij},0,0\}$.

接下来, 构造如下的Lyapunov函数:

$$V_k=x_k^{\mathrm{T}}P_{\alpha_k}x_k, \tag{22}$$

记ΔV_k是V_k的前向差分.

$$\begin{aligned}&\mathrm{E}\{\Delta V_k\}=\mathrm{E}\{V_{k+1}-V_k|x_k,\alpha_k=p\}=\\&\mathrm{E}\{x_{k+1}^{\mathrm{T}}\bar{P}_px_{k+1}-x_k^{\mathrm{T}}P_px_k\}=\\&\mathrm{E}\{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\vartheta_{pi}\pi_{pj}x_{k+1}^{\mathrm{T}}\bar{P}_px_{k+1}-x_k^{\mathrm{T}}P_px_k\}=\\&\mathrm{E}\{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\vartheta_{pi}\pi_{pj}\xi_k^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}\mathscr{E}_{pj}^{\mathrm{T}}\\ B_{2p}^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\bar{P}_p\begin{bmatrix}\mathscr{E}_{pj}\ B_{2p}\end{bmatrix}\xi_k-\\&x_k^{\mathrm{T}}P_px_k\},\end{aligned} \tag{23}$$

其中: $\xi_k=[\xi_{1k}^{\mathrm{T}}\ \ w_k^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}},\ \xi_{1k}=[x_k^{\mathrm{T}}\ \ e_k^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$.

由于引入了事件触发机制, 根据式(6), 可得

$$\lambda_ix_k^{\mathrm{T}}R_ix_k-e_k^{\mathrm{T}}R_ie_k\geqslant 0, \tag{24}$$

将式(24)代入式(23), 可得

$$\begin{aligned}&\mathrm{E}\{\Delta V_k\}\leqslant\\&\mathrm{E}\{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\vartheta_{pi}\pi_{pj}(\xi_k^{\mathrm T}\begin{bmatrix}\mathscr{E}_{pj}^{\mathrm T}\\B_{2p}^{\mathrm T}\end{bmatrix}\bar P_p[\mathscr{E}_{pj}\ B_{2p}]\xi_k+\\&\xi_{1k}^{\mathrm T}\mathscr{B}_i\xi_{1k})-x_k^{\mathrm T}P_px_k\}.\end{aligned}\tag{25}$$

注意到随机稳定性定义中的$w_k\equiv 0$, 根据式(25), 可得

$$\begin{aligned}&\mathrm{E}\{\Delta V_k\}\leqslant\mathrm{E}\{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\vartheta_{pi}\pi_{pj}\xi_{1k}^{\mathrm T}\varXi_{pij}^2\xi_{1k}-x_k^{\mathrm T}P_px_k\}<\\&\mathrm{E}\{\xi_{1k}^{\mathrm T}(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\vartheta_{pi}\pi_{pj}\tilde G_{pij})\xi_{1k}-x_k^{\mathrm T}P_px_k\}=\\&\mathrm{E}\{x_k^{\mathrm T}(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\vartheta_{pi}\pi_{pj}G_{pij}-P_p)x_k\}\leqslant\varphi\mathrm{E}\{x_k^{\mathrm T}x_k\},\end{aligned}\tag{26}$$

其中: $\varphi=\lambda_{\max}(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\vartheta_{pi}\pi_{pj}G_{pij}-P_p)$, “$<$”是根据式(21)推得.

由式(26)可知

$$\mathrm{E}\{\sum_{k=0}^{\infty}\Delta V_k\}=\mathrm{E}\{V_\infty-V_0\}<\varphi\mathrm{E}\{\sum_{k=0}^{\infty}x_k^{\mathrm T}x_k\},\tag{27}$$

由式(15)可知, $\varphi<0$, 因此,

$$\begin{aligned}&\mathrm{E}\{\sum_{k=0}^{\infty}x_k^{\mathrm T}x_k\}<\frac{1}{\varphi}\mathrm{E}\{V_\infty-V_0\}\leqslant\\&-\frac{1}{\varphi}\mathrm{E}\{V_0\}<\infty,\end{aligned}\tag{28}$$

与定义1的条件(13)一致. 因此, 系统(12)的随机稳定性得证.

接下来, 将证明系统(12)是严格$(\mathcal U,\mathcal S,\mathcal V)$–$\gamma$–耗散的. 考虑如下性能指标:

$$J=\sum_{k=0}^{N}\mathrm{E}\{w_k^{\mathrm T}(\gamma I-\mathcal V)w_k-z_k^{\mathrm T}\mathcal Uz_k-2z_k^{\mathrm T}\mathcal Sw_k\},\tag{29}$$

在零初始条件下, 结合式(24), 则有

$$\begin{aligned}&J\leqslant\\&\sum_{k=0}^{N}\mathrm{E}\{w_k^{\mathrm T}(\gamma I-\mathcal V)w_k-z_k^{\mathrm T}\mathcal Uz_k-2z_k^{\mathrm T}\mathcal Sw_k+\\&\Delta V_k+\lambda_ix_k^{\mathrm T}R_ix_k-e_k^{\mathrm T}R_ie_k\}\leqslant\\&\sum_{k=0}^{N}\mathrm{E}\{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\vartheta_{pi}\pi_{pj}\xi_k^{\mathrm T}\varXi_{pij}^1\xi_k-x_k^{\mathrm T}P_px_k\}<\\&\sum_{k=0}^{N}\mathrm{E}\{\xi_k^{\mathrm T}(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\vartheta_{pi}\pi_{pj}\hat G_{pij})\xi_k-x_k^{\mathrm T}P_px_k\}=\\&\sum_{k=0}^{N}\mathrm{E}\{x_k^{\mathrm T}(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\vartheta_{pi}\pi_{pj}G_{pij}-P_p)x_k\}<0,\end{aligned}\tag{30}$$

其中上述两个“$<$”分别由式(20)和式(15)可得. 上式意味着定义2中的条件(14)成立, 因此系统(12)是严格$(\mathcal U,\mathcal S,\mathcal V)$–$\gamma$–耗散的, 定理得证. 证毕.

注 4 在定理1中, 笔者引入了矩阵G_{pij}, 将式(16)与条件概率ϑ_{pi}和π_{pj}分离以简化设计. 否则, 随着系统模态数的增加, 用于系统设计的线性矩阵不等式维数会急剧增加, 计算复杂度和难度也会相应增加. 此外, 由于定理1中给出的充分条件中含有非线性项, 难以直接求解触发器和控制器参数, 因此需要进一步借助矩阵不等式变换技术对其进行处理.

4 非同步的事件触发器和控制器设计

本节将在定理1的基础上进一步给出非同步的事件触发器和控制器的矩阵参数求解方法.

定理 2 对于给定矩阵($\mathcal U\leqslant 0,\mathcal S,\mathcal V^{\mathrm T}=\mathcal V$)和标量$\lambda_i$, 闭环控制系统(12)是随机稳定且是严格$(\mathcal U,\mathcal S,\mathcal V)$–$\gamma$–耗散的, 若存在矩阵$\widehat K_j\in\mathbb R^{n_u\times n_x}$, $Q\in\mathbb R^{n_x\times n_x}$, 正定矩阵$\widehat P_p\in\mathbb R^{n_x\times n_x}$, $\widehat G_{pij}\in\mathbb R^{n_x\times n_x}$, $\widehat R_i\in\mathbb R^{n_x\times n_x}$, 以及正定对角矩阵$W_{pij}\in\mathbb R^{n_u\times n_u}$, 对于$\forall p,i,j\in\mathbb N$, 满足如下条件:

$$\begin{bmatrix}-\widehat P_p&\varUpsilon_p\\ *&\mathscr G_p\end{bmatrix}<0,\tag{31}$$

$$\begin{bmatrix}\mathscr P&0&\mathscr M_{pij}\\ *&-I&\mathscr L_{pij}\\ *&*&\mathscr H_{pij}\end{bmatrix}<0,\tag{32}$$

其中:

$\varUpsilon_p=[\sqrt{\eta_{p11}}\widehat P_p\cdots\sqrt{\eta_{pij}}\widehat P_p\cdots\sqrt{\eta_{pnn}}\widehat P_p]$,

$\mathscr G_p=\mathrm{diag}\{-\widehat G_{p11},\cdots,-\widehat G_{pij},\cdots,-\widehat G_{pnn}\}$,

$\eta_{pij}=\vartheta_{pi}\pi_{pj},\ \mathscr P=\mathrm{diag}\{-\widehat P_1,-\widehat P_2,\cdots,-\widehat P_n\}$,

$\mathscr M_{pij}=[\sqrt{\partial_{p1}}\mathscr Z_{pij}^{\mathrm T}\ \ \sqrt{\partial_{p2}}\mathscr Z_{pij}^{\mathrm T}\ \ \cdots\ \ \sqrt{\partial_{pn}}\mathscr Z_{pij}^{\mathrm T}]^{\mathrm T}$,

$\mathscr Z_{pij}=[\widehat A_{pj}^*\ \ B_{1p}M_1\widehat K_j\ \ B_{2p}\ \ 0\ \ B_{1p}M_2W_{pij}]$,

$\mathscr L_{pij}=[\mathcal U_1\widehat C_{pj}^*\ \ \mathcal U_1\widehat D_{1pj}^*\ \ \mathcal U_1D_{2p}\ \ 0\ \ \mathcal U_1D_{1p}M_2W_{pij}]$,

$\widehat A_{pj}^*=A_pQ+B_{1p}M_1\widehat K_j,\ \widehat C_{pj}^*=C_pQ+D_{1p}M_1\widehat K_j$,

$\widehat D_{1pj}^*=D_{1p}M_1\widehat K_j,\ \varGamma_{pij}=\widehat G_{pij}+\lambda_i\widehat R_i-Q^{\mathrm T}-Q$,

$$\mathscr H_{pij}=\begin{bmatrix}\varGamma_{pij}&0&-(\widehat C_{pj}^*)^{\mathrm T}\mathcal S&\widehat K_j^{\mathrm T}&0\\ *&-\widehat R_i&-(\widehat D_{1pj}^*)^{\mathrm T}\mathcal S&\widehat K_j^{\mathrm T}&0\\ *&*&\varPsi_p&0&-\mathcal S^{\mathrm T}D_{1p}M_2W_{pij}\\ *&*&*&-W_{pij}&0\\ *&*&*&*&-W_{pij}\end{bmatrix}.$$

同时, 若式(31)和式(32)存在可行解, 则事件触发器的加权矩阵R_i和控制器增益矩阵K_j可由下式确定:

$$R_i=(Q^{\mathrm T})^{-1}\widehat R_iQ^{-1},\ K_j=\widehat K_jQ^{-1}.\tag{33}$$

证 首先, 令

$$\begin{cases}\widehat P_p=P_p^{-1},\widehat G_{pij}=G_{pij}^{-1},\\ \widehat K_j=K_jQ,\widehat R_i=Q^{\mathrm T}R_iQ,\end{cases}\tag{34}$$

其中Q为一个松弛可逆矩阵.

式(15)可重写为

$$-P_p - \bar{\Upsilon}_p(\mathscr{G}_p)^{-1}\bar{\Upsilon}_p^{\mathrm{T}} < 0, \tag{35}$$

其中$\bar{\Upsilon}_p = [\sqrt{\eta_{p11}}I \ \cdots \ \sqrt{\eta_{pij}}I \ \cdots \ \sqrt{\eta_{pnn}}I]$. 由Schur补引理可知, 式(35)等价于

$$\begin{bmatrix} -P_p & \bar{\Upsilon}_p \\ * & \mathscr{G}_p \end{bmatrix} < 0, \tag{36}$$

对式(36)分别左乘和右乘矩阵$\mathrm{diag}\{\widehat{P}_p, I, \cdots, I\}$, 便可得式(31). 这意味着式(31)和式(15)是等价的.

接下来, 将式(16)重写为

$$\begin{bmatrix} \mathscr{P} & 0 & \bar{\mathscr{M}}_{pij} \\ * & -I & \bar{\mathscr{L}}_{pij} \\ * & * & \bar{\mathscr{H}}_{pij} \end{bmatrix} < 0, \tag{37}$$

其中:

$\bar{\mathscr{M}}_{pij} = [\sqrt{\partial_{p1}}\bar{\mathscr{Z}}_{pij}^{\mathrm{T}} \ \sqrt{\partial_{p2}}\bar{\mathscr{Z}}_{pij}^{\mathrm{T}} \ \cdots \ \sqrt{\partial_{pn}}\bar{\mathscr{Z}}_{pij}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$,

$\bar{\mathscr{Z}}_{pij} = [\bar{A}_{pj}^* \ \ \bar{B}_{1pj}^* \ \ B_{2p} \ \ 0 \ \ B_{1p}M_2W_{pij}]$,

$\bar{\mathscr{L}}_{pij}$和$\bar{\mathscr{H}}_{pij}$的表达式通过比较式(16)和式(37)便可得知, 为节省篇幅此处不再赘述.

另一方面, 有下列不等式成立:

$$(\widehat{G}_{pij} - Q)^{\mathrm{T}}(\widehat{G}_{pij})^{-1}(\widehat{G}_{pij} - Q) \geqslant 0, \tag{38}$$

对其展开可得

$$-Q^{\mathrm{T}}(\widehat{G}_{pij})^{-1}Q \leqslant \widehat{G}_{pij} - Q^{\mathrm{T}} - Q. \tag{39}$$

令$\mathscr{Q} = \mathrm{diag}\{I, \cdots, I, I, Q^{\mathrm{T}}, Q^{\mathrm{T}}, I, I, I\}$, 对式(37)分别左$\mathscr{Q}$和右乘$\mathscr{Q}^{\mathrm{T}}$, 同时将式(39)和式(34)代入, 即可得式(32). 由此可知, 式(32)和式(16)等价. 此外, 若式(31)和式(32)有解, 则待求解的触发器和控制器参数(33)可根据式(34)变换所得. 由此定理得证.

证毕.

注 5　在定理2中, 笔者引入了松弛矩阵Q和矩阵不等式缩放技术, 将复杂的非线性控制问题转化为基于LMI的线性控制问题, 可通过MATLAB中的LMI工具箱方便求解. 此外, 参数γ表示系统的耗散控制性能, γ越大则系统的耗散性越好. 同时, 最优性能γ^*可通过求解如下的凸优化问题获得

$$\begin{aligned} &\min \quad -\gamma, \\ &\text{s.t.} \quad 式(31)\text{–}(32), \end{aligned} \tag{40}$$

5　仿真研究

本节将借助一个2模态Markov跳变系统的仿真来验证所提出的设计方法的有效性. 系统的参数如下:

$$\left[\begin{array}{c|c|c} A_1 & B_{11} & B_{21} \\ \hline C_1 & D_{11} & D_{21} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{cc|cc|c} 1.45 & 1 & 1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.6 & 0.1 & 0.1 & 0.05 \\ \hline 1.6 & 0.2 & 0.1 & 1 & 0.2 \end{array}\right],$$

$$\left[\begin{array}{c|c|c} A_2 & B_{12} & B_{22} \\ \hline C_2 & D_{12} & D_{22} \end{array}\right] = \left[\begin{array}{cc|cc|c} 0.1 & 0.6 & 0.5 & 0.8 & 0.1 \\ 0.8 & -1.1 & 0.2 & 0.1 & 0.02 \\ \hline 1 & 1.5 & 0.9 & 0.5 & 0.4 \end{array}\right].$$

原系统的TPM$\varPhi$, 触发器的CPM$\varTheta$和控制器的CPM$\varPi$分别为

$$\varPhi = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.4 & 0.6 \end{bmatrix}, \varTheta = \begin{bmatrix} 0.75 & 0.25 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix}, \varPi = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 \\ 0.8 & 0.2 \end{bmatrix}.$$

设触发器的阈值参数为$\lambda_1 = 0.09$, $\lambda_2 = 0.12$; 执行器的故障参数为$\underline{a}_s = 0.85$, $\bar{a}_s = 0.95$; 耗散参数为$(\mathcal{U}, \mathcal{S}, \mathcal{V}) = (-1, 1, 5)$. 由定理2的设计方法, 可得系统耗散控制性能指标$\gamma^* = 2.7186$, 事件触发器的加权矩阵

$$R_1 = \begin{bmatrix} 211.0209 & -92.3556 \\ -92.3556 & 409.7473 \end{bmatrix},$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 226.7332 & -115.1254 \\ -115.1254 & 403.8423 \end{bmatrix},$$

以及控制器的增益矩阵

$$K_1 = \begin{bmatrix} -1.7378 & -0.5329 \\ 1.6338 & -2.3610 \end{bmatrix},$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} -1.7314 & -0.5426 \\ 1.3868 & -2.1672 \end{bmatrix}.$$

设系统的初始值为$x_0 = [0.3 \ \ 0.2]^{\mathrm{T}}$, 外部扰动$w_k = \sin k \times 0.9^k$. 当系统在无控制作用时是不稳定的, 如图1所示. 将所提出的非同步事件触发控制方案施加至系统上时, 结果如图2所示, 从图中可以清晰地看到在扰动作用下系统的状态和输出曲线逐渐趋于平衡点, 意味着闭环控制系统是随机稳定的. 同时, 图3描绘了各事件触发时刻及相邻两次触发时刻的间隔. 从图中可知, 传感器的数据传输量显著降低, 经计算, 在上述的事件触发机制作用下, 传感器仅发送了所有采样数据($\lambda_1 = \lambda_2 = 0$)的61.4%, 有效节约了带宽资源.

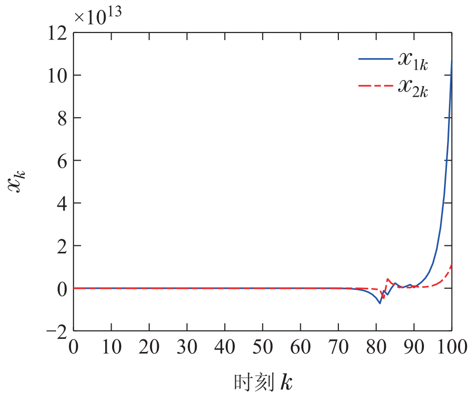

图 1　无控制作用时系统的状态变化曲线

Fig. 1　The evolution curves of system states without control

接下来, 假设其他参数不变, 研究不同执行器故障参数对系统耗散控制性能的影响, 结果如表1所示. 从表1可以清楚地看到, 当$\underline{a}_s$=1, $\bar{a}_s$=1, 即无故障时, 系统的耗散控制性能最好. 当执行器故障增加时, 系统的耗散性能也将随之下降.

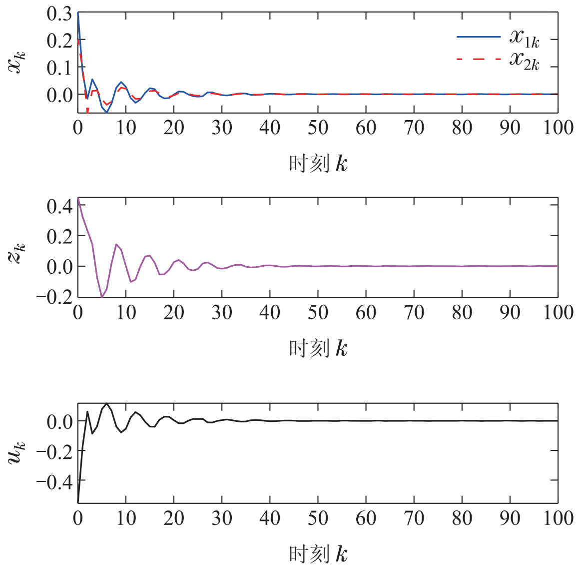

图 2 有控制作用时系统状态、输出和控制量

Fig. 2 The system states, output and control input under control

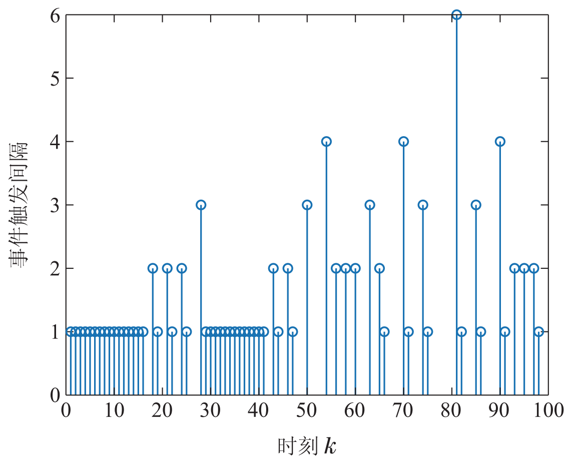

图 3 事件触发时刻及相邻触发间隔

Fig. 3 The event-triggered release instant and release interval

表 1 不同执行器故障参数下的耗散控制性能

Table 1 The dissipative control performance with different actuator failure parameters

故障参数$(\underline{a}_s, \bar{a}_s)$	(1, 1)	(0.85, 0.95)	(0.7, 0.9)
γ^*	3.8336	2.7186	无解

另外, 本文采用HMM来刻画非同步现象, 该模型的关键在于CPM, 可以反映非同步程度. 接下来, 将通过对不同的CPM$\varPi$和CPM$\varTheta$的仿真来考察非同步特性对系统耗散控制性能的影响. 首先, 令控制器的

$$\mathrm{CPM}\varPi=\begin{bmatrix}\pi_{11} & 1-\pi_{11}\\ \pi_{21} & 1-\pi_{21}\end{bmatrix},$$

其中: $\pi_{11},\pi_{21}\in[0,1]$, 其他参数保持不变. 图4显示了最优耗散控制性能γ^*随π_{11},π_{21}变化的三维分布图. 该图形以$(\pi_{11},\pi_{21})=(0.5,0.5)$为中心对称点, 并在$\pi_{11}+\pi_{21}=1$方向上, 可以发现, γ^*的分布类似一条对称抛物线. 当$\varPi$的列交换, γ^*的值保持不变, 这是由于模态的顺序是人为设定的, 在设计控制器时只需要通过交换K_1和K_2的顺序即可保持系统性能不变. 此外, 在该方向上, 当$\pi_{11}=0$或$\pi_{11}=1$时, γ^*达到最大值4.2346, 而当$\pi_{11}=0.5$时, γ^*达到最小值2.6757. 实际上, 前者表示同步情况, 后者是指最强非同步情况. 由此可知, 当控制器和系统间的非同步程度提高时, 闭环控制系统的耗散性能将会随之下降. 更有趣的是, 在$\pi_{11}=\pi_{21}$方向上, γ^*值处处相等且达到最小值2.6757. 在这种情况下, $\varPi$中的行是相等的, 意味着控制器的模态与原对象模态是无关的, 此时系统的耗散性能自然是最差的.

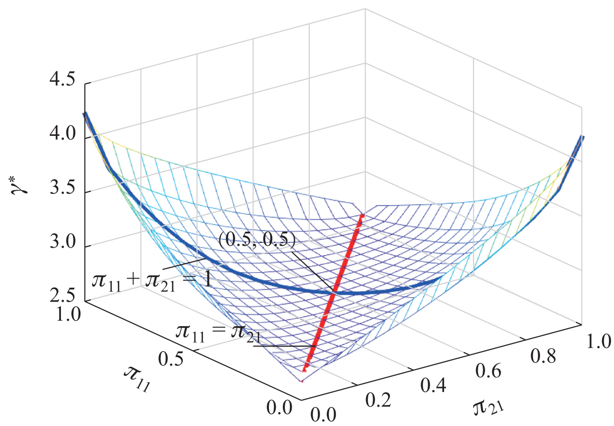

图 4 不同CPM$\varPi$下的耗散控制性能

Fig. 4 The dissipative control performance with varying CPM$\varPi$

类似地, 令事件触发器的

$$\mathrm{CPM}\varTheta=\begin{bmatrix}\vartheta_{11} & 1-\vartheta_{11}\\ \vartheta_{21} & 1-\vartheta_{21}\end{bmatrix},$$

其中: $\vartheta_{11},\vartheta_{21}\in[0,1]$, 其他参数保持不变. 并对$\lambda_1=0.09$, λ_2=0.12和λ_1=λ_2=0.12两种情况进行仿真, 可得最优耗散控制性能γ^*随$\vartheta_{11},\vartheta_{21}$变化的三维分布图分别如图5和图6所示. 从图5中可以发现, $\vartheta_{11},\vartheta_{21}$值越大, 闭环控制系统的耗散性能越好. 这是因为$\vartheta_{11}$, ϑ_{21}越大意味着触发器运行在模态1的概率就越大, 由于触发器阈值参数λ_1<λ_2, 而λ越小, 系统的耗散性能就越好(这个结论将会在下面的仿真中得以验证). 在图6中, 由于触发器阈值参数λ_1=λ_2, 因此, 两个模态下的触发器设计是可交换的, 因此得到的图形类似于控制器的非同步情形.

最后, 将进一步考察触发器的阈值参数λ_i对系统耗散控制性能以及数据传输率(date transfer rate, DTR)的影响. 为方便起见, 假设$\lambda_1=\lambda_2=\lambda$, 基于定理2, 得到的仿真结果如表2所示. 容易发现, 当$\lambda=0$

(即周期触发)时, 系统的耗散性能最好, 但此时传感器的采样数据需要全部被传输. 随着λ值增加, 数据传输率有效降低, 但相应的耗散性能也会有所下降. 考虑到耗散性能和数据传输性能之间的矛盾, 在实际应用时可根据需要折衷选取一个合适的λ值来获取较为满意的综合性能.

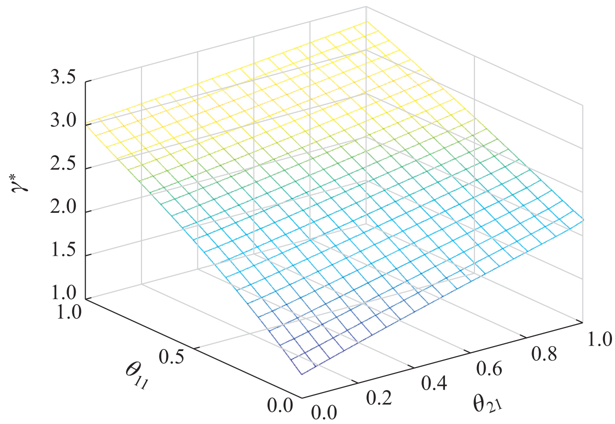

图 5　当λ_1= 0.09, λ_2=0.12时不同CPMΘ下的耗散控制性能

Fig. 5　The dissipative control performance with varying CPMΘ when λ_1= 0.09, λ_2=0.12

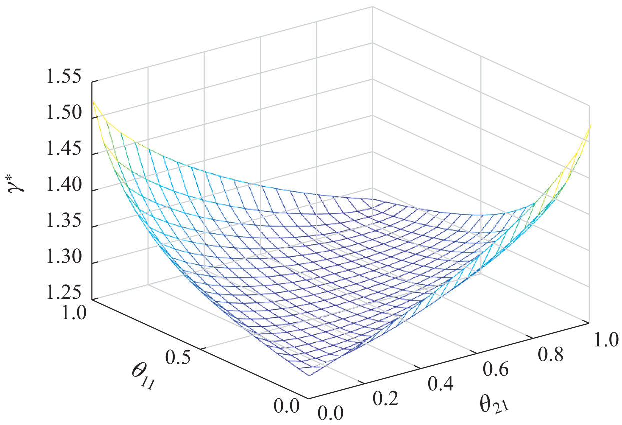

图 6　当λ_1=λ_2=0.12时不同CPMΘ下的耗散控制性能

Fig. 6　The dissipative control performance with varying CPMΘ when λ_1=λ_2=0.12

表 2　不同λ下的耗散控制性能和数据传输率

Table 2　The dissipative control performance and data transfer rate with varying λ

λ	0	0.01	0.05	0.1	0.12
γ^*	5.0322	4.8461	4.3282	2.8703	1.3255
DTR %	100	76.24	64.36	61.19	60

6　结论

本文主要研究了具有执行器故障的离散MJSs的非同步事件触发耗散容错控制问题. 引入了非同步事件触发器来降低传感器的采样数据传输率, 采用了两个独立的HMMs分别描述触发器、控制器与原系统之间的非同步现象. 在此框架下, 基于Lyapunov稳定性和耗散理论, 得到了闭环系统在执行器存在故障情况下随机稳定并严格耗散的充分条件. 并利用松弛矩阵、矩阵缩放等矩阵不等式处理技术, 给出了非同步的触发器和控制器矩阵参数的求解方法, 实现了触发器和控制器的联合设计. 最后, 通过仿真验证了设计方法的有效性, 并详细分析了执行器故障参数、触发器和控制器的条件概率矩阵, 以及触发器阈值参数对系统性能的影响. 对于存在时延、丢包、量化和非线性等问题, 以及非同步事件触发输出反馈控制问题值得未来进一步研究.

参考文献:

[1] UGRINOVSKII V A, POTA H R. Decentralized control of power systems via robust control of uncertain Markov jump parameter systems. *International Journal of Control*, 2005, 78(9): 662 – 677.

[2] DONG K K, PARK P G, KO J W. Output-feedback H$_\infty$ control of systems over communication networks using a deterministic switching system approach. *Automatica*, 2004, 40(7): 1205 – 1212.

[3] GRAG W S, GONZALEZ O R, DOGAN M. Stability analysis of digital linear flight controllers subject to electromagnetic disturbances. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(4): 1204 – 1218.

[4] ROGEMAR S M, ROBERT J E. *Hidden Markov Models in Finance*. New York, US: Springer, 2007.

[5] ABERKANE S, DEAGAN V. H$_\infty$ filtering of periodic Markovian jump systems: Application to filtering with communication constraints. *Automatica*, 2012, 48(12): 3151 – 3156.

[6] KAO Y G, XIE J, WANG C H, et al. A sliding mode approach to H$_\infty$ non-fragile observer-based control design for uncertain Markovian neutral-type stochastic systems. *Automatica*, 2015, 52: 218 – 226.

[7] LI F, XU S Y, SHEN H, et al. Passivity-based control for hidden Markov jump systems with singular perturbations and partially unknown probabilities. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(8): 3701 – 3706.

[8] FU L, MA Y C, GUAN W. Dissipative control for singular T–S fuzzy Markov jump systems under quantized feedback. *IEEE Access*, 2019, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2919067.

[9] TAO J, LU R Q, SHI P, et al. Dissipativity-based reliable control for fuzzy Markov jump systems with actuator faults. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 47(9): 2377 – 2388.

[10] WANG Shixian, LI Junyi, ZHANG Bin. Synchronization control of jumping coupled cyber physical system with actuator failures under deception attacks. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(4): 170 – 177.
(王士贤, 李军毅, 张斌. 欺骗攻击环境下具有执行器故障的跳变耦合信息物理系统的同步控制. 控制理论与应用, 2020, 37(4): 170 – 177.)

[11] YU H, MA Y C, LIU J W, et al. Extended dissipative analysis for T–S fuzzy semi-Markov jump systems with sampled-data input and actuator fault. *Nonlinear Analysis Hybrid Systems*, 2021, DOI: 10.1016/j.nahs.2020.101010.

[12] LI H Y, SHI P, YAO D Y. Adaptive sliding-mode control of Markov jump nonlinear systems with actuator faults. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(4): 1933 – 1939.

[13] XIA W F, XU S Y, LU J W, et al. Event-triggered filtering for discrete-time Markovian jump systems with additive time-varying delays. *Applied Mathematics and Computation*, 2021, DOI: 10.1016/j.amc.2020.125630.

[14] LI H C, ZUO Z Q, WANG Y J. Event triggered control for Markovian jump systems with partially unknown transition probabilities and actuator saturation. *Journal of the Franklin Institute*, 2016, 358(8): 1848 – 1861.

[15] SHEN H, SU L, WU Z G, et al. Reliable dissipative control for Markov jump systems using an event-triggered sampling information scheme. *Nonlinear Analysis Hybrid Systems*, 2017, 25: 41 – 59.

[16] CAO D G, JIN Y J, QI W H. Synchronization for stochastic semi-Markov jump neural networks with dynamic event-triggered scheme. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, DOI: 10.1016/j.jfranklin.2021.07.058.

[17] ZENG P Y, DENG F Q, LIU X H, et al. Event-triggered H_∞ control for network-based uncertain Markov jump systems under DoS attacks. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, 358(1): 2895 – 2914.

[18] DOLGOV M, HANEBECK U D. Static output-feedback control of Markov jump linear systems without mode observation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(10): 5401 – 5406.

[19] SHEN H, LI F, WU Z G, et al. Finite-time l_2-l_∞ tracking control for Markov jump repeated scalar nonlinear systems with partly usable model information. *Information Sciences*, 2016, 332: 153 – 166.

[20] SHEN M Q, PARK J H, YE D. A separated approach to control of Markov jump nonlinear systems with general transition probabilities. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(9): 2010 – 2018.

[21] OLIVEIRA R C L F, VARGAS A N, VAL J B R D, et al. Mode-independent H_2-control of a DC motor modeled as a Markov jump linear system. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(5): 1915 – 1919.

[22] TODOROV M G, FRAGOSO M D. New methods for mode-independent robust control of Markov jump linear systems. *Systems & Control Letters*, 2016, 90: 38 – 44.

[23] ZHANG L X, GAO H J. Asynchronously switched control of switched linear systems with average dwell time. *Automatica*, 2010, 46(5): 953 – 958.

[24] WANG J, LI F, SUN Y H, et al. On asynchronous l_2-l_∞ filtering for networked fuzzy systems with Markov jump parameters over a finite-time interval. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 10(17): 2175 – 2185.

[25] WU Z G, SHI P, SHU Z, et al. Passivity-based asynchronous control for Markov jump systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(4): 2020 – 2025.

[26] SHEN Y, WU Z G, SHI P, et al. H_∞ control of Markov jump time-delay systems under asynchronous controller and quantizer. *Automatica*, 2019, 99: 352 – 360.

[27] YAN H C, ZHANG H, YANG F W, et al. Event-triggered asynchronous guaranteed cost control for Markov jump discrete-time neural networks with distributed delay and channel fading. *IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems*, 2017, 29(8): 2588 – 3598.

[28] WANG H T, WANG Y Q, ZHUANG G M. Asynchronous H_∞ controller design for neutral singular Markov jump systems under dynamic event-triggered schemes. *Journal of the Franklin Institute*, 2020, 358(1): 494 – 515.

[29] WANG H T, WANG Y Q, ZHUANG G M, et al. Asynchronous passive dynamic event-triggered controller design for singular Markov jump systems with general transition rates under stochastic cyber-attacks. *IET Control Theory & Applications*, 2020, 14(16): 2291 – 2302.

[30] WANG X, PARK J H, YANG H L, et al. An improved fuzzy event-triggered asynchronous dissipative control to T–S FMJSs with non-periodic sampled data. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2020, 29(10): 2926 – 2937.

[31] SHI Y, YU B．Output feedback stabilization of networked control systems with random delays modeled by Markov chains. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(7): 1668 – 1674．

[32] TAN Z Q, SOH Y C, XIE L H. Dissipative control for linear discrete-time systems. *Automatica*, 1999, 35(9): 1557 – 1564．

[33] GAO H J, CHEN T W, LAM J. A new delay system approach to network-based control. *Automatica*, 2008, 44(1): 39 – 52．

作者简介:

陈惠英 博士, 副教授, 目前研究方向为混杂系统分析与综合、多传感器信息融合与估计, E-mail: hychen@zjhu.edu.cn;

刘仁伟 硕士研究生, 目前研究方向为混杂系统分析与设计, E-mail: 1228250953@qq.com;

夏卫锋 博士, 副教授, 目前研究方向为随机系统分析与控制、鲁棒控制与滤波, E-mail: xwf212@163.com;

李祖欣 博士, 教授, 目前研究方向为网络化控制系统、分布(智能)嵌入式系统, E-mail: lzx@zjhu.edu.cn.