



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



具有带宽约束和不可靠通信信道的Markov跳变系统的混合事件/时间驱动 H_∞ 控制

闫晶晶, 张梦宇, 马运亮

引用本文:

闫晶晶,张梦宇,马运亮. 具有带宽约束和不可靠通信信道的Markov跳变系统的混合事件/时间驱动 H_∞ 控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3681–3689.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1223>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于T-S模糊模型的多时滞非线性网络切换控制系统非脆弱 H_∞ 控制

Non-fragile H_∞ control for multi-delay nonlinear network switching control system based on T-S model

控制与决策. 2021, 36(5): 1087–1094 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1098>

具有不确定丢包率和时变采样周期的Delta算子系统故障检测

Fault detection for delta operator systems with uncertain packet dropout rate and time-varying sampling periods

控制与决策. 2021, 36(5): 1101–1109 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1154>

基于数据驱动的非线性网络系统自适应迭代学习控制

Data driven adaptive learning control of nonlinear network system

控制与决策. 2021, 36(6): 1523–1528 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1182>

事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 H_∞ 故障检测

Event-triggered H_∞ fault detection for networked control systems with distributed delays

控制与决策. 2020, 35(12): 3059–3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

自适应事件触发的马尔科夫跳变多智能体系统一致性

Adaptive event-triggered consensus for Markovian jumping multi-agent systems

控制与决策. 2020, 35(11): 2780–2786 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1507>

具有带宽约束和不可靠通信信道的 Markov 跳变系统的 混合事件/时间驱动 H_∞ 控制

闫晶晶^{1†}, 张梦宇¹, 马运亮²

(1. 河南工业大学 电气工程学院, 郑州 450001;
2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 研究具有不可靠通信信道和有限带宽约束的 Markov 跳变系统的混合事件/时间驱动 H_∞ 控制问题. 为处理有限带宽约束, 首先, 基于驱动误差、辅助变量和切换时刻设计分布式混合事件/时间驱动机制以确定每个传感器节点的驱动时刻; 其次, 提出一种新的 TOD (try-once-discard) 调度协议以保证在驱动时刻仅有唯一的传感器节点接入网络. 此外, 将不可靠通信信道导致的数据丢包现象建模为伯努利分布, 基于驱动时刻的数据传输情况构建随机序列和调度矩阵序列, 对数据接收情况进行建模. 以此为基础, 利用线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, LMI) 得到保证闭环 Markov 跳变系统在有扰动时随机稳定和有限增益 L_2 随机稳定的充分性条件, 并给出反馈增益阵的设计方法. 最后, 通过实例仿真验证所提出方法的有效性.

关键词: Markov 跳变系统; 混合事件/时间驱动控制; 带宽约束; 不可靠通信信道; H_∞ 性能; 线性矩阵不等式
中图分类号: TP13 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1223

引用格式: 闫晶晶, 张梦宇, 马运亮. 具有带宽约束和不可靠通信信道的 Markov 跳变系统的混合事件/时间驱动 H_∞ 控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3681-3689.

Mixed event/time-triggered H_∞ control for Markov jump systems with bandwidth constraints and unreliable communication channels

YAN Jing-jing^{1†}, ZHANG Meng-yu¹, MA Yun-liang²

(1. College of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Xuji Electric Corporation Limited, Xuchang 461000, China)

Abstract: This paper investigates the problem of mixed event/time-triggered H_∞ control of Markov jump systems suffered by unreliable communication channels and limited bandwidth constraints. To deal with the finite bandwidth constraints, a distributed mixed event/time-triggered mechanism is firstly designed based on triggered errors, auxiliary variables and switching times to determine the triggered instants of each sensor node. Secondly, a novel TOD (try-once-discard) scheduling protocol is proposed, which ensures that only a unique sensor node is connected to the network at the triggered instants. Furthermore, the data packet loss caused by unreliable communication channels is modeled as Bernoulli distribution. The random sequence and scheduling matrix sequence are constructed based on the data transmitted at the triggered times, and the data reception is modeled. Based on this, by using linear matrix inequality, the sufficient conditions are obtained to ensure that the closed-loop Markov jump system is stochastic stable without disturbances and finite gain L_2 stochastic stable with disturbances, and the design methods of feedback gain matrix are given. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through simulation.

Keywords: Markov jump systems; mixed event/time-triggered control; bandwidth constraints; unreliable communication channels; H_∞ performance; linear matrix inequality

收稿日期: 2023-08-28; 录用日期: 2024-01-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61773154); 河南省高校科技创新人才支持计划项目 (24HASTIT039); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目 (2020GGJS085); 河南工业大学青年骨干教师培育计划项目 (21420079).

责任编委: 虞文武.

[†]通讯作者. E-mail: yanjingjing2009@163.com.

0 引言

Markov跳变系统由于其其在单连杆机械臂^[1]、交通流控制系统^[2]、飞机控制系统^[3]等领域的应用而受到学者的广泛关注^[4]。网络的引入给系统带来便利的同时,也带来数据丢包、通讯限制等问题。针对具有带宽约束和不可靠通信信道的Markov跳变系统的稳定和镇定问题研究已成为近年来的研究热点。

针对Markov跳变系统的不可靠通信问题的研究已取得了大量的成果。文献[5]构造了具有数据丢包和不确定参数的Markov跳变系统的全阶滤波器。文献[6]采用单指数平滑方法提出一种新的丢包补偿策略。可见,现有结果的研究重点在于对丢包数据的补偿策略设计,未同时考虑数据驱动传输问题。

数据驱动传输策略可有效减小网络带宽的占用。针对Markov跳变系统,文献[7]引入事件驱动通讯机制和滤波器,将故障检测问题转化为 H_∞ 滤波问题。文献[8]基于事件触发机制,设计依赖于模态的弹性保性能控制器。文献[9]引入混杂驱动机制和双通道对量化器,实现了系统性能和通信数据传输率之间的平衡。

现有的结果大多基于静态事件驱动机制(static event-triggered mechanism, SEM)设计数据传输策略。文献[10]进一步提出了动态事件驱动传输策略(dynamic event-triggered mechanism, DEM),并被应用于Markov跳变系统的鲁棒输出反馈控制器设计^[11]、模糊滑模控制问题^[12]以及递归分布式滤波问题^[13]。但是,以上结果均没有考虑多节点同时接入网络时的通信信道分配问题。

在网络带宽约束下,当多个节点同时向网络传输数据时会发生数据冲突。为避免冲突,需要传输调度协议来分配通信通道。TOD协议^[14]是一个广泛使用的调度协议。本文拟耦合事件驱动机制,提出基于差值的TOD协议来处理网络带宽约束。

本文研究具有不可靠通信信道和有限带宽约束的Markov跳变系统的 H_∞ 控制问题。提出一种分布式混合事件/时间驱动机制,并设计改进的TOD调度协议以消除带宽有限导致的数据冲突。针对满足伯努利分布的数据丢包现象,构建随机序列以描述接收数据序列。最终得到保证闭环系统在无扰动时随机稳定和有限增益 L_2 随机稳定的充分性条件,并给出反馈增益阵的设计方法。

1 系统架构和问题描述

本文讨论的系统架构如图1所示,其中 (a, b, k) 表示在时刻 k 收集变量 a 和 b 。在时刻 $k \in \mathbb{N}$,第 i ($\forall i \in$

$\{1, 2, \dots, N\}$)个节点采集系统的状态信息 $x_i(k)$ 和模态信息 $\sigma(k)$,并传送至分布式驱动器。驱动器决定每个节点的驱动时刻 $s_m^i, \forall m \in \mathbb{Z}$ 。基于节点调度协议,确定唯一可以接入网络的节点编号。设数据传输过程可能发生丢包现象。若传输成功,则Buffer收到驱动时刻传输的信息;否则,Buffer收到空信号,记为 \emptyset 。Buffer利用自身存储的节点的最新数据生成信息 $x_c(k)$ 并传送给控制器。控制器利用 $x_c(k)$ 设计控制算法 $u(k)$ 对系统进行控制。

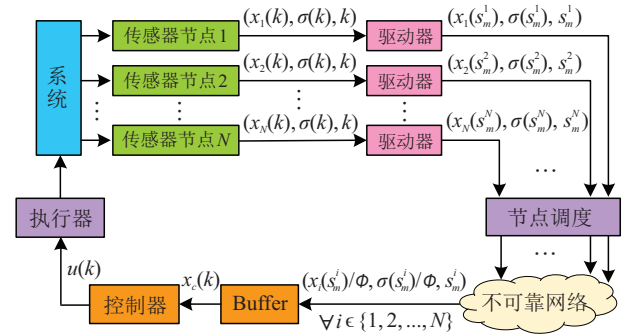


图1 系统架构

1.1 Markov跳变系统

图1中的系统为离散时间Markov跳变系统,即

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_{\sigma(k)}x(k) + B_{1\sigma(k)}u(k) + B_{2\sigma(k)}w(k), \\ z(k) &= C_{\sigma(k)}x(k) + D_{\sigma(k)}u(k), \quad \forall k \in \mathbb{N}. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 为状态向量; $u(k) \in \mathbb{R}^s$ 为控制向量; $w(k)$ 为干扰信号; $z(k) \in \mathbb{R}^c$ 为系统输出; $A_{\sigma(k)}$ 、 $B_{1\sigma(k)}$ 、 $B_{2\sigma(k)}$ 、 $C_{\sigma(k)}$ 、 $D_{\sigma(k)}$ 为Markov跳变系统的子系统;切换规律 $\sigma(k) : [0, \infty) \rightarrow M = \{1, 2, \dots, r\}$ 服从Markov跳变过程,其模态转移概率矩阵为 $\Gamma = [\pi_{pq}]$,有

$$\begin{aligned} P\{\sigma(k+1) = q | \sigma(k) = p\} &= \pi_{pq}, \\ P\{\sigma(k+1) = p | \sigma(k) = p\} &= 1 - \pi_{pp}, \end{aligned}$$

且 $\pi_{pq} > 0, \pi_{pp} = - \prod_{q=1, q \neq p}^r \pi_{pq}$ 。

控制规则为

$$u(k) = K_{\sigma_c(k)_i}x_c(k). \quad (2)$$

其中: $x_c(k)$ 和 $u(k)$ 分别为控制器的输入和输出; $K_{\sigma_c(k)_i}$ 为增益矩阵, $\sigma_c(k) \in M$ 为控制器的模态, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 表示 k 时刻之前的驱动时刻(或 k 时刻)传输第 i 个传感器节点。

1.2 混合事件/时间驱动机制

由于网络资源有限,针对每个传感器节点,本文提出分布式动态混合事件/时间驱动机制(dynamic mixed event/time-triggered mechanism, DMEM)。定义

传感器节点*i*的第*m*+1个驱动时间为

$$s_{m+1}^i = \inf_{k \in \mathbb{N}} \left\{ k > s_m^i \mid \begin{array}{l} \textcircled{1} \theta_i \delta_i(k) > \eta_i(k) \\ \textcircled{2} \bigcup_{l=1}^{\infty} \tilde{t}_l \end{array} \right\}. \quad (3)$$

其中: \tilde{t}_l 为系统模态的第*l*个切换时刻; $\delta_i(k)$ 定义为

$$\delta_i(k) = e_i^T(k) \Phi_i e_i(k) - \bar{h}_i x_i^T(s_m^i) \Phi_i x_i(s_m^i), \quad (4)$$

且 $e_i(k) = x_i(k) - x_i(s_m^i)$, $0 < \bar{h}_i < 1$, Φ_i 为任意给定的正定加权矩阵. 辅助变量 $\eta_i(k+1)$ 满足

$$\eta_i(k+1) = \rho_i \eta_i(k) - \delta_i(k), \quad \eta_i(0) = \eta_{i0} > 0. \quad (5)$$

其中: ρ_i 满足 $0 < \rho_i < 1$, $\rho_i \theta_i > 1$.

1.3 调度协议

设在驱动时刻只有一个节点可以访问网络, 令 $H(s_m^i)$ 表示在驱动时刻 s_m^i 获得网络访问权限的传感器节点, 定义为

$$H(s_m^i) = \arg \min_j \{ j \in [1, N] \mid \Delta_j(s_m^i) = I, \Psi(s_m^i) \},$$

其中 $\Psi(s_m^i) = \text{diag}\{\Delta_1(s_m^i), \dots, \Delta_N(s_m^i)\}$. 采用改进的TOD调度协议决定 $\Delta_i(s_m^i) = I$ 是否成立, 从而决定在驱动时刻 s_m^i 通过网络传输的唯一的传感器节点 $j \in [1, N]$. 改进的TOD协议描述为

$$\Delta_j(s_m^i) = \begin{cases} I, & j = \min_j \{ \arg \max_j (\theta_j \delta_j(s_m^i) - \eta_j(s_m^i)) \}; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

1.4 不可靠网络的丢包

假设不可靠网络传输导致传感器到控制器的数据可能发生丢包. 设丢包满足伯努利分布, 由于数据传输发生在驱动时刻 s_m^i , 定义伯努利分布 $\{\alpha(s_m^i)\} = \{\alpha(s_{m_0}^{i_0}), \alpha(s_{m_1}^{i_1}), \dots\}$, 其中

$$\alpha(s_{m_h}^{i_h}) = \begin{cases} 1, & s_{m_h}^{i_h} \text{时刻数据传输成功;} \\ 0, & s_{m_h}^{i_h} \text{时刻发生数据丢包;} \end{cases} \quad \forall h \in \mathbb{N}.$$

定义随机序列

$$\{\alpha(k)\} = \underbrace{\{\alpha(0), \dots, \alpha(0)\}}_{s_{m_1}^{i_1} - s_{m_0}^{i_0}}, \dots, \underbrace{\{\alpha(s_m^i), \dots, \alpha(s_m^i)\}}_{s_{m_+}^{i_+} - s_m^i}, \dots, \quad (6)$$

以及调度矩阵序列

$$\{\Psi(k)\} = \underbrace{\{\Psi(0), \dots, \Psi(0)\}}_{s_{m_1}^{i_1} - s_{m_0}^{i_0}}, \dots, \underbrace{\{\Psi(s_m^i), \dots, \Psi(s_m^i)\}}_{s_{m_+}^{i_+} - s_m^i}, \dots.$$

设 $x_c(k)$ 表示 $k \in [s_m^i, s_{m_+}^{i_+})$ 的控制器输入, $x_c(k-1)$ 表示 $k \in [s_{m_-}^{i_-}, s_m^i)$ 的控制器输入, 其中

$s_{m_-}^{i_-}$ 指 s_m^i 时刻之前的最后一个驱动时刻. 可得

$$\begin{aligned} x_c(k) &= \\ &\alpha(k) \Psi(k) x(s_m^i) + (1 - \alpha(k)) \Psi(k) x_c(k-1) + \\ &(I - \Psi(k)) x_c(k-1) = \\ &\alpha(k) \Psi(k) (x(k) - e(k)) + \\ &(I - \alpha(k) \Psi(k)) x_c(k-1). \end{aligned} \quad (7)$$

由式(6)得 $\alpha(k) = \alpha(s_m^i)$, $\forall k \in (s_m^i, s_{m_+}^{i_+})$, 故有

$$\text{Prob}\{\alpha(k) = 1\} = \text{Prob}\{\alpha(s_m^i) = 1\} = \bar{\alpha},$$

$$\text{Prob}\{\alpha(k) = 0\} = \text{Prob}\{\alpha(s_m^i) = 0\} = 1 - \bar{\alpha}. \quad (8)$$

结合式(2)和(7), 系统输入 $u(k)$ 可表示为

$$\begin{aligned} u(k) &= K_{pi} \alpha(k) \Psi(k) (x(k) - e(k)) + \\ &K_{mi} (I - \alpha(k) \Psi(k)) x_c(k-1), \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $p = \sigma(k)$ 对应于控制器模态与系统模态匹配的情况, 且 $m = \sigma(k - \hat{k})$ 对应于丢包导致控制器模态与系统模态可能不匹配的情况, $k - \hat{k}$ 表示 k 时刻之前最近一次传输成功的时刻.

1.5 闭环系统模型和本文主要目的

基于式(1)和(9), 闭环Markov跳变系统为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \\ &A_p x(k) + B_{1p} K_{pi} \alpha(k) \Psi(k) (x(k) - e(k)) + \\ &B_{1p} K_{mi} (I - \alpha(k) \Psi(k)) x_c(k-1) + B_{2p} w(k), \\ z(k) &= C_p x(k) + D_p K_{pi} \alpha(k) \Psi(k) (x(k) - e(k)) + \\ &D_p K_{mi} (I - \alpha(k) \Psi(k)) x_c(k-1). \end{aligned} \quad (10)$$

为分析上述系统的稳定性, 定义增广状态

$$\xi(k) = [x(k)^T \quad x_c^T(k-1)]^T \in \mathbb{R}^{2n}.$$

定义1(随机稳定性) 设 $w(k) = 0$, 如果存在正定矩阵 $W > 0$, 使得对于任意的初始条件 ξ_0 , 均有 $E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \|\xi(k)\|^2\right\} < \xi_0^T W \xi_0$ 成立, 则称闭环系统(10)是随机稳定的.

定义2(有限增益 L_2 随机稳定性) 若存在常数 $\gamma_0 > 0$ 和 $\gamma_w > 0$, 使得对于任意的 z_0 和 $w(k) \in L_2$, 均有 $\|z(k)\|_E \leq \gamma_0 \|z_0\| + \gamma_w \|w(k)\|$ 成立, 其中 $\|z(k)\|_E = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} E\{\|z(k)\|^2\}}$, 则称系统(10)从 $w(k)$ 到 $z(k)$ 有限增益 L_2 随机稳定.

2 主要结果

2.1 随机稳定性

设 $k (\forall k \in \mathbb{N})$ 时刻的前一个驱动时刻, 第 $i (\forall i \in \{1, 2, \dots, N\})$ 个传感器节点接入网络(若 k 为驱动时刻, 则假设当前时刻第 i 个节点接入网络). 定义 $\bar{\Psi}_i$ 为

具有 N 个对角块的对角矩阵,其中第 i 个块是与 $x_i(k)$ 维数相同的单位矩阵,其余块等于零.

$i \in \{1, 2, \dots, N\}$,若存在正定矩阵 $Q_{1pi} \in \mathbb{R}^{n \times n}$,正常数 $\theta_i > 1, \varepsilon > 0$ 和 $0 < \bar{p}_{pi} \leq \lambda_{\min}(Q_{1pi})$ 使得下式成立:

定理 1 对于任意的 $p, q (\neq p), m, f \in M$ 和

$$\begin{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{\alpha}Q_{ppi} + (1 - \bar{\alpha})Q_{pmi} & 0 \\ 0 & \varepsilon\bar{p}_{pi}\Phi Q_{1pi} \end{bmatrix} & \hat{U}_{ppi}^T & \hat{U}_{ppi}^T \\ * & -[\bar{\alpha}(1 + \pi_{pp})]^{-1}Q_{pfi} & 0 \\ * & * & - \prod_{q=1, q \neq p}^r (\bar{\alpha}\pi_{pq})^{-1}Q_{qfi} \\ * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \\ * & * & * \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_{pmi}^T & \hat{U}_{pmi}^T & (E_{31}^{P_{1pi}})^T & -(E_{31}^{P_{1pi}})^T \bar{h}\Phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -[(1 - \bar{\alpha})(1 + \pi_{pp})]^{-1}Q_{pfi} & 0 & 0 & 0 \\ * & - \prod_{q=1, q \neq p}^r [(1 - \bar{\alpha})\pi_{pq}]^{-1}Q_{qfi} & 0 & 0 \\ * & * & -(\bar{h}\Phi)^{-1} & 0 \\ * & * & * & -(I - \bar{h})\Phi \end{bmatrix} < 0. \quad (11)$$

其中: $Q_{pmi} = \text{diag}\{Q_{1pi}, Q_{1mi}\}, \Phi = \text{diag}\{\Phi_1, \dots, \Phi_N\}, \bar{h} = \text{diag}\{\bar{h}_1, \dots, \bar{h}_N\}$ 且 $\Phi_i > 0$ 和 $0 < \bar{h}_i < 1$ 由式(4)给定. 则闭环系统(10)在 $w(k) \equiv 0$ 时随机稳定,且 $K_{pi} = G_{pi}Q_{1pi}^{-1}$.

证明 选取 Lyapunov 函数为

$$V_{pmi}(k) = \xi(k)^T P_{pmi} \xi(k) + \bar{\eta}(k). \quad (12)$$

其中: $P_{pmi} = Q_{pmi}^{-1} = \text{diag}\{Q_{1pi}^{-1}, Q_{1mi}^{-1}\} = \text{diag}\{P_{1pi}, P_{1mi}\}, p = \sigma(k), m = \sigma(k - \hat{k}) = \sigma_c(k), \bar{\eta}(k) = \eta_1(k) + \eta_2(k) + \dots + \eta_N(k)$ 且 $\eta_i(k) (\forall i \in \{1, 2, \dots, N\})$ 由式(5)定义.

定义随机序列 $\{\bar{\alpha}(k)\} = \{\alpha(k) - \bar{\alpha}\}, \forall k \in \mathbb{N}$. 显然,该序列满足 $E\{\bar{\alpha}(k)\} = 0, E\{\bar{\alpha}(k)^2\} = \bar{\alpha}(1 - \bar{\alpha})$.

对于式(10)和(7),用 $\bar{\alpha}(k) + \bar{\alpha}$ 代替 $\alpha(k)$,有

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= (\bar{\alpha}(k)X_{1mpi} + X_{2mpi})P_{ei}\xi_{ek} + B_{2p}w(k), \\ x(k) &= [P_{1pi}^{-1} \ 0 \ 0]P_{ei}\xi_{ek}, \\ x_c(k) &= (\bar{\alpha}(k)Y_{1mpi} + Y_{2mpi})P_{ei}\xi_{ek}. \end{aligned}$$

其中 $\xi_e(k) = [\xi(k)^T \ e(k)^T]^T$ 且

$$\begin{aligned} X_{1pmi} &= [B_{1p}G_{pi}\bar{\Psi}_i, -B_{1p}G_{mi}\bar{\Psi}_i, -B_{1p}G_{pi}\bar{\Psi}_i], \\ X_{2pmi} &= [A_p P_{1pi}^{-1} + \bar{\alpha}B_{1p}G_{pi}\bar{\Psi}_i, -\bar{\alpha}B_{1p}G_{mi}\bar{\Psi}_i + \\ & \quad B_{1p}G_{mi}, -\bar{\alpha}B_{1p}G_{pi}\bar{\Psi}_i], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{1pmi} &= [\bar{\Psi}_i P_{1pi}^{-1} \ -\bar{\Psi}_i P_{1mi}^{-1} \ -\bar{\Psi}_i P_{1pi}^{-1}], \\ Y_{2pmi} &= [\bar{\alpha}\bar{\Psi}_i P_{1pi}^{-1} \ (I - \bar{\alpha}\bar{\Psi}_i)P_{1mi}^{-1} \ -\bar{\alpha}\bar{\Psi}_i P_{1pi}^{-1}], \\ G_{pi} &= K_{pi}P_{1pi}^{-1}, \quad G_{mi} = K_{mi}P_{1mi}^{-1}, \\ P_{ei} &= \begin{bmatrix} P_{pmi} & 0 \\ 0 & P_{1pi} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

故有

$$\xi(k + 1) = U_{pmi}\bar{\xi}_e(k). \quad (13)$$

其中: $\bar{\xi}_e(k) = P_{ei}\xi_e(k)$ 且 $U_{pmi} = \bar{\alpha}(k)U_{1pmi} + U_{2pmi}, U_{1pmi} = [X_{1pmi}^T \ Y_{1pmi}^T]^T, U_{2pmi} = [X_{2pmi}^T \ Y_{2pmi}^T]^T$.

令 $\sigma(k + 1) = q, \sigma_c(k + 1) = f$,则有

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &= V_{qfi}(k + 1) - V_{pmi}(k) = \\ & \xi(k + 1)^T P_{qfi}\xi(k + 1) - \xi(k)^T P_{pmi}\xi(k) + \\ & \bar{\eta}(k + 1) - \bar{\eta}(k) \leq \\ & \bar{\xi}_e(k)^T U_{pmi}^T P_{qfi} U_{pmi} \bar{\xi}_e(k) + \varepsilon e(k)^T \Phi e(k) + \\ & \bar{\eta}(k + 1) - \bar{\eta}(k) - \bar{\xi}_e(k)^T \Upsilon_{pmi} \bar{\xi}_e(k), \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $\Upsilon_{pmi} = \begin{bmatrix} P_{pmi}^{-1} & 0 \\ 0 & \varepsilon\bar{p}_{pi}\Phi P_{1pi}^{-1} \end{bmatrix}$. 令 $\eta(k) = [\eta_1(k), \dots, \eta_N(k)]^T$, 定义 $R_I = [1, \dots, 1], R_\rho = [\rho_1, \dots, \rho_N], R_{\rho-I} = [\rho_1 - 1, \dots, \rho_N - 1]$. 由

式(5)可得

$$\begin{aligned} \bar{\eta}(k+1) - \bar{\eta}(k) &= R_{\rho-I}\eta(k) - R_I\delta(k) = \\ &R_{\rho-I}\eta(k) + \begin{bmatrix} \bar{\xi}_e(k) \\ e(k) \end{bmatrix}^\top \times \\ &\begin{bmatrix} (E_{31}^{P_{1p_i}})^\top \bar{h}\Phi E_{31}^{P_{1p_i}} & -(E_{31}^{P_{1p_i}})^\top \bar{h}\Phi \\ * & -[I - \bar{h}]\Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\xi}_e(k) \\ e(k) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

其中: $\delta(k) = [\delta_{1k}, \dots, \delta_{Nk}]^\top, E_{31}^{P_{1p_i}} = [P_{1p_i}^{-1}, 0, 0]$.

将上式代入(14)可得

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &\leq \begin{bmatrix} \bar{\xi}_e(k) \\ e(k) \end{bmatrix}^\top F_{pmqfi} \begin{bmatrix} \bar{\xi}_e(k) \\ e(k) \end{bmatrix} + \\ &R_{\rho-I}\eta(k) + \varepsilon e(k)^\top \Phi e(k), \end{aligned} \quad (15)$$

其中

$$F_{pmqfi} = \begin{bmatrix} (E_{31}^{P_{1p_i}})^\top \bar{h}\Phi E_{31}^{P_{1p_i}} + & -(E_{31}^{P_{1p_i}})^\top \bar{h}\Phi \\ U_{pmi}^\top P_{qfi} U_{pmi} - \Upsilon_{pmi} & \\ * & -[I - \bar{h}]\Phi \end{bmatrix}.$$

由 $0 < \rho_i < 1$ 和 $\eta_i(k) > 0, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 可得: 对于任意给定的 $\theta_i > 1$, 总存在充分小的 $0 < \bar{h}_i < 1$ 和 $\varepsilon > 0$ 使得 $R_{\rho-I}\eta(k) + \varepsilon e(k)^\top \Phi e(k) = \sum_{i=1}^N [(\rho_i - 1)\eta_i(k) + \varepsilon e_i(k)^\top \Phi_i e_i(k)] \leq 0$. 结合式(15)有

$$\Delta V(k) \leq \begin{bmatrix} \bar{\xi}_e(k) \\ e(k) \end{bmatrix}^\top F_{pmqfi} \begin{bmatrix} \bar{\xi}_e(k) \\ e(k) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

针对丢包情况(即 $\alpha(k)$) 和切换情况(即 p 和 q), F_{pmqfi} 中的项 $U_{pmi}^\top P_{qfi} U_{pmi}$ 呈现不同的表达式.

1) 若 $\alpha(k) = 1$ 且 $p = q$, 则 $\sigma(k) = \sigma_c(k) = \sigma(k+1) = p$ 且 $U_{pmi}^\top P_{qfi} U_{pmi} = \hat{U}_{ppi}^\top P_{pfi} \hat{U}_{ppi}$, 其中 $\hat{U}_{ppi} = (1 - \bar{\alpha})U_{1ppi} + U_{2ppi}$.

2) 若 $\alpha(k) = 1$ 且 $\sigma(k) = \sigma_c(k) = p, \sigma(k+1) = q \neq p$, 则 $U_{pmi}^\top P_{qfi} U_{pmi} = \hat{U}_{ppi}^\top P_{qfi} \hat{U}_{ppi}$.

3) 若 $\alpha(k) = 0$ 且 $\sigma(k) = \sigma(k+1) = p, \sigma_c(k) = m$, 则 $U_{pmi}^\top P_{qfi} U_{pmi} = \hat{U}_{pmi}^\top P_{pfi} \hat{U}_{pmi}$, 其中 $\hat{U}_{pmi} = -\bar{\alpha}U_{1pmi} + U_{2pmi}$.

4) 若 $\alpha(k) = 0$ 且 $\sigma(k) = p, \sigma(k+1) = q \neq p, \sigma_c(k) = m$, 则 $U_{pmi}^\top P_{qfi} U_{pmi} = \hat{U}_{pmi}^\top P_{qfi} \hat{U}_{pmi}$.

注意, 由于 q 和 f 是否相等取决于 $\alpha(k+1)$ 的取值, 此处没有分情况讨论.

令 $E\{F_{pmqfi}\} := \bar{F}_{pmqfi}$, 基于系统模态转移概率矩阵 Γ 和丢包率(8), 对式(16)两边求均值, 可得

$$E\{\Delta V(k)\} \leq \begin{bmatrix} \bar{\xi}_e(k) \\ e(k) \end{bmatrix}^\top \bar{F}_{pmqfi} \begin{bmatrix} \bar{\xi}_e(k) \\ e(k) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{F}_{pmqfi} &= \\ &\begin{bmatrix} (E_{31}^{P_{1p_i}})^\top \bar{h}\Phi E_{31}^{P_{1p_i}} + \Pi_{pqmi} - & -(E_{31}^{P_{1p_i}})^\top \bar{h}\Phi \\ \bar{\alpha}\Upsilon_{ppi} - (1 - \bar{\alpha})\Upsilon_{pmi} & \\ * & -[I - \bar{h}]\Phi \end{bmatrix}, \\ \Pi_{pqmi} &= (1 + \pi_{pp})\bar{\alpha}\hat{U}_{ppi}^\top P_{pfi} \hat{U}_{ppi} + \\ &\prod_{q=1, q \neq p}^r \pi_{pq} \bar{\alpha} \hat{U}_{ppi}^\top P_{qfi} \hat{U}_{ppi} + \\ &(1 + \pi_{pp})(1 - \bar{\alpha})\hat{U}_{pmi}^\top P_{pfi} \hat{U}_{pmi} + \\ &\prod_{q=1, q \neq p}^r \pi_{pq}(1 - \bar{\alpha})\hat{U}_{pmi}^\top P_{qfi} \hat{U}_{pmi}. \end{aligned} \quad (18)$$

若 $\bar{F}_{pmqfi} < 0$, 则 $E\{\Delta V(k)\} < 0$. 利用 Schur 补引理, 令 $Q_{pmi} = P_{pmi}^{-1}$, 可得 $\bar{F}_{pmqfi} < 0$ 等价于式(11)成立. 故而, 若式(11)成立, 则将(17)两边从 $k = 0$ 到 $k = \infty$ 求和, 并考虑到

$$E\{\bar{\xi}_e(k)^\top \bar{\xi}_e(k)\} \geq \min_{p \in M} \{\lambda_{\min}(P_{1p_i}^2)\} E\{\|\xi(k)\|^2\},$$

可得

$$\begin{aligned} &E\{\xi(\infty)^\top P_{p_\infty m_\infty i_\infty} \xi(\infty)\} + \bar{\eta}(\infty) - \\ &\xi(0)^\top P_{p_0 m_0 i_0} \xi(0) - \bar{\eta}(0) \leq \end{aligned}$$

$$\tilde{\lambda} \min_{p \in M, i \in \{1, \dots, N\}} \{\lambda_{\min}(P_{1p_i}^2)\} E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \|\xi(k)\|^2\right\}.$$

其中: p_∞ 和 m_∞ 分别表示 ∞ 时刻的系统模态和控制器模态, i_∞ 对应于 ∞ 时刻传输的节点, 而 p_0 和 m_0 分别表示 0 时刻的系统模态和控制器模态, i_0 表示 0 时刻传输的节点且

$$\tilde{\lambda} = \max_{p, m, q \neq p, f \in M, i \in \{1, \dots, N\}} \{\lambda_{\max}(\bar{F}_{pmqfi})\} < 0.$$

由于 $E\{\xi(\infty)^\top P_{p_\infty m_\infty i_\infty} \xi(\infty)\} + \bar{\eta}(\infty) \geq 0$ 且总存在矩阵 $P_\eta > 0$ 使得 $\bar{\eta}(0) = \xi(0)^\top P_\eta \xi(0)$, 可得 $E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \|\xi(k)\|^2\right\} \leq \xi_0^\top W \xi_0$, 其中 $W = -(\tilde{\lambda} \min_{p \in M, i \in \{1, \dots, N\}} \{\lambda_{\min}(P_{1p_i}^2)\})^{-1} (P_{p_0 m_0 i_0} + P_\eta) > 0$. 故系统(10)在 $w(k) \equiv 0$ 时随机稳定. \square

2.2 H_∞ 性能

定理2 假设参数与定理1中参数一致且存在常数 $\gamma > 0$ 使得下式(19)和(20)成立, 则闭环系统(10)是从 $w(k)$ 到 $z(k)$ 有限增益 L_2 随机稳定的, 且控制器增益为 $K_{p_i} = G_{p_i} Q_{1p_i}^{-1}$.

$$\begin{bmatrix}
 - \begin{bmatrix} \bar{\alpha}Q_{ppi} + (1 - \bar{\alpha})Q_{pmi} & 0 \\ 0 & \varepsilon\bar{p}_{pi}\Phi Q_{1pi} \end{bmatrix} & \hat{U}_{ppi}^\top & \hat{U}_{ppi}^\top & \hat{U}_{pmi}^\top \\
 * & -[\bar{\alpha}(1 + \pi_{pp})]^{-1}Q_{pfi} & 0 & 0 \\
 * & * & - \prod_{q=1, q \neq p}^r (\bar{\alpha}\pi_{pq})^{-1}Q_{qfi} & 0 \\
 * & * & * & -[(1 - \bar{\alpha}) \times (1 + \Pi_{pp})]^{-1}Q_{pfi} \\
 * & * & * & * \\
 * & * & * & * \\
 * & * & * & * \\
 * & * & * & * \\
 * & * & * & * \\
 \hat{U}_{pmi}^\top & ((1 - \bar{\alpha})M_{1ppi} + M_{2ppi})^\top & (-\bar{\alpha}M_{1pmi} + M_{2pmi})^\top & (E_{31}^{P_{1pi}})^\top & -(E_{31}^{P_{1pi}})^\top \bar{h}\Phi \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \leftarrow - \prod_{q=1, q \neq p}^r [(1 - \bar{\alpha})\pi_{pq}]^{-1}Q_{qfi} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 * & -\bar{\alpha}^{-1}I & 0 & 0 & 0 \\
 * & * & -(1 - \bar{\alpha})^{-1}I & 0 & 0 \\
 * & * & * & -(\bar{h}\Phi)^{-1} & 0 \\
 * & * & * & * & (\bar{h} - I)\Phi
 \end{bmatrix} < 0, \tag{19}$$

$$\begin{bmatrix}
 -\gamma^2 I & \hat{B}_{2p}^\top & \hat{B}_{2p}^\top \\
 * & -(1 + \pi_{pp})^{-1}Q_{pfi} & 0 \\
 * & * & - \prod_{q=1, q \neq p}^r (\pi_{pq})^{-1}Q_{qfi}
 \end{bmatrix} < 0. \tag{20}$$

证明 若 $w(k) \neq 0$, 则类似于式(13)的分析, 有

$$\xi(k + 1) = U_{pmi}\bar{\xi}_e(k) + \hat{B}_{2p}w(k), \tag{21}$$

其中 $\hat{B}_{2p} = [B_{2p}^\top, 0]^\top$. 此外, 基于随机序列 $\{\tilde{\alpha}(k)\} = \{\alpha(k) - \bar{\alpha}\}$, $z(k)$ 可以表示为

$$z(k) = [\tilde{\alpha}(k)M_{1pmi} + M_{2pmi}]\bar{\xi}_e(k) := M_{pmi}\bar{\xi}_e(k). \tag{22}$$

其中

$$\begin{aligned}
 M_{1pmi} &= [D_p G_{pi}\bar{\Psi}_i, -D_p G_{mi}\bar{\Psi}_i, -D_p G_{pi}\bar{\Psi}_i], \\
 M_{2pmi} &= [C_p P_{1pi}^{-1} + \bar{\alpha}D_p G_{pi}\bar{\Psi}_i, D_p G_{mi} - \\
 &\quad \bar{\alpha}D_p G_{mi}\bar{\Psi}_i, -\bar{\alpha}D_p G_{pi}\bar{\Psi}_i].
 \end{aligned}$$

综合式(14)、(21)和(22), 且由 $U_{pmi}^\top P_{qfi}\hat{B}_{2p} = 0$ 可得

$$\begin{aligned}
 \Delta V(k) + z(k)^\top z(k) - \gamma^2 w(k)^\top w(k) &\leq \\
 \begin{bmatrix} \bar{\xi}_e(k) \\ e(k) \end{bmatrix}^\top J_{pmqfi} \begin{bmatrix} \bar{\xi}_e(k) \\ e(k) \end{bmatrix} + \\
 w(k)^\top (\hat{B}_{2p}^\top P_{qfi} \hat{B}_{2p} - \gamma^2 I) w(k), &\tag{23}
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 J_{pmqfi} &= \\
 \begin{bmatrix} (E_{31}^{P_{1pi}})^\top \bar{h}\Phi E_{31}^{P_{1pi}} - \Upsilon_{pmi} + & -(E_{31}^{P_{1pi}})^\top \bar{h}\Phi \\ U_{pmi}^\top P_{qfi} U_{pmi} + M_{pmi}^\top M_{pmi} & \\ * & -[I - \bar{h}]\Phi \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

对式(23)两边取均值, 可得

$$\begin{aligned}
 E\{\Delta V(k) + z(k)^\top z(k) - \gamma^2 w(k)^\top w(k)\} &\leq \\
 \begin{bmatrix} \bar{\xi}_e(k) \\ e(k) \end{bmatrix}^\top \bar{J}_{pmqfi} \begin{bmatrix} \bar{\xi}_e(k) \\ e(k) \end{bmatrix} + \\
 w(k)^\top (\hat{\Omega}_{pqfi} - \gamma^2 I) w(k). &\tag{24}
 \end{aligned}$$

其中

$$\bar{J}_{pmqfi} = \begin{bmatrix} (E_{31}^{P_{1pi}})^\top \bar{h}\Phi E_{31}^{P_{1pi}} + & -(E_{31}^{P_{1pi}})^\top \bar{h}\Phi \\ \Pi_{pqmi} + \Omega_{pmi} & \\ * & -[I - \bar{h}]\Phi \end{bmatrix},$$

Π_{pqmi} 由式(20)定义且

$$\begin{aligned}
 \Omega_{pmi} &= -\bar{\alpha}\Upsilon_{ppi} - (1 - \bar{\alpha})\Upsilon_{pqi} + \\
 &\quad \bar{\alpha}((1 - \bar{\alpha})M_{1ppi} + M_{2ppi})^\top \times \\
 &\quad ((1 - \bar{\alpha})M_{1ppi} + M_{2ppi}) + \\
 &\quad (1 - \bar{\alpha})(-\bar{\alpha}M_{1pmi} + M_{2pmi})^\top \times \\
 &\quad (-\bar{\alpha}M_{1pmi} + M_{2pmi}),
 \end{aligned}$$

$$\hat{\Omega}_{pqfi} = \hat{B}_{2p}^T \left((1 + \pi_{pp})P_{pfi} + \prod_{q=1, q \neq p}^r \pi_{pq}P_{qfi} \right) \hat{B}_{2p}$$

令 $Q_{pmi} = P_{pmi}^{-1}$, 由Schur补引理有 $\bar{J}_{pmqfi} < 0$ 等价于式(19), 且 $\hat{\Omega}_{pqfi} - \gamma^2 I < 0$ 等价于式(20). 若式(19)和(20)成立, 则对式(24)两边取数学期望, 可得

$$E\{\xi(\infty)^T P_{p_\infty m_\infty i_\infty} \xi(\infty)\} - \xi(0)^T P_{p_0 m_0 i_0} \xi(0) + \bar{\eta}(\infty) - \bar{\eta}(0) + \sum_{k=0}^{\infty} E\{z(k)^T z(k)\} - \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} w(k)^T w(k) < 0,$$

即有

$$\sum_{k=0}^{\infty} E\{z(k)^T z(k)\} < \xi(0)^T P_{p_0 m_0 i_0} \xi(0) + \bar{\eta}(0) + \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} w(k)^T w(k).$$

对于初始条件 z_0 , 总存在常数 $\gamma_z > 0$ 使得 $\xi(0)^T \times P_{p_0 m_0 i_0} \xi(0) + \bar{\eta}(0) = \gamma_z^2 \|z_0\|^2$, 从而有

$$\|z(k)\|_E^2 < \gamma_z^2 \|z_0\|^2 + \gamma^2 \|w(k)\|^2,$$

即得 $\|z(k)\|_E < \gamma_z \|z_0\| + \gamma \|w(k)\|$. 可见闭环系统(10)是从 $w(k)$ 到 $z(k)$ 有限增益 L_2 随机稳定的. \square

3 仿真算例

3.1 RLC电路

首先采用切换RLC电路进行仿真研究. 令采样时间为1s, RLC电路可由离散时间Markov跳变系统(1)^[15]描述. 其中: $\sigma(k) = p \in \{1, 2\}$, $x_1(k)$ 为电容 C_p 的电量, $x_2(k)$ 为电感 L_p 的磁通量, $u(k)$ 为输入电压, $z(k)$ 为测量输出, 且系统矩阵为

$$A_1 = [0.7238, 0.0072; -0.7238, -0.0072],$$

$$A_2 = [0.9131, 0.0091; -0.8210, -0.0082],$$

$$B_{11} = [-0.8218; 0.7958],$$

$$B_{12} = [-0.2123; 0.1289],$$

$$B_{21} = [-0.9019; 0.5107],$$

$$B_{22} = [-0.8119; -0.1001],$$

$$C_1 = [0, 0.3333], C_2 = [0, 0.1111],$$

$$D_1 = -0.5288, D_2 = -0.2912.$$

令 $i \in \{1, 2\}$. 设 $\bar{\alpha} = 0.2213, \Phi = I, \bar{h} = 0.01, \varepsilon = 19.0878$ 且 $\Gamma = [0.9059, 0.0941; 0.9664, 0.0336]$.

若 $w(k) = 0$, 则由式(11)可解得: $\bar{p}_{11} = 0.6264, \bar{p}_{21} = 0.7495, \bar{p}_{12} = 0.1071, \bar{p}_{22} = 0.8776, K_{11} =$

$$[0.0074, 0], K_{21} = [0.2521, 0], K_{12} = [0, 0.0019], K_{22} = [0, 0.0032].$$

令 $x_0 = [6; -5], \eta_{10} = 18, \eta_{20} = 15, \theta_1 = 2.5, \theta_2 = 2, \rho_1 = 0.95, \rho_2 = 0.9$, 则随机生成的系统模态 $\sigma(k)$ 和对应的控制器模态 $\sigma_c(k)$ 如图2所示. 由于存在数据丢包, 控制器模态与系统模态可能不匹配.

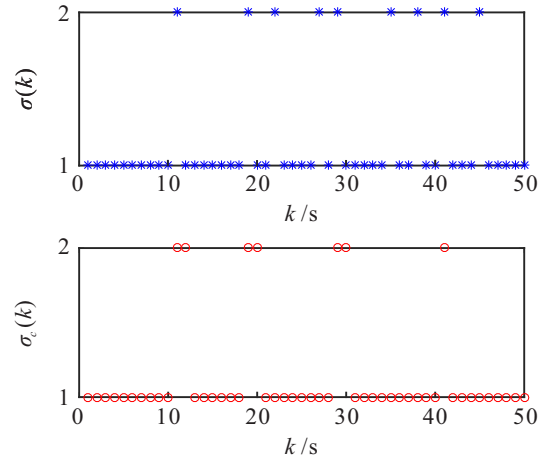


图2 系统模态 $\sigma(k)$ 和控制器模态 $\sigma_c(k)$

令 $w(k) = 0$, 对系统循环运行500次, 得到 $E\{\|\xi(k)\|^2\}$ 如图3所示. 由 $E\{\|\xi(k)\|^2\} < 180$ 和 $\lim_{k \rightarrow \infty} E\{\|\xi(k)\|^2\} = 0$ 有 $E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \|\xi(k)\|^2\right\} < \infty$, 故而闭环系统(10)随机稳定.

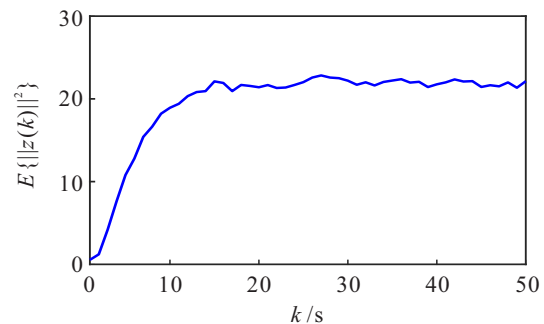


图3 RLC电路的随机稳定性

若 $w(k) \neq 0$, 令 $\gamma = 1$ 且其他变量如前所述, 由式(19)和(20)可得: $\bar{p}_{11} = 0.7802, \bar{p}_{21} = 0.3897, \bar{p}_{12} =$

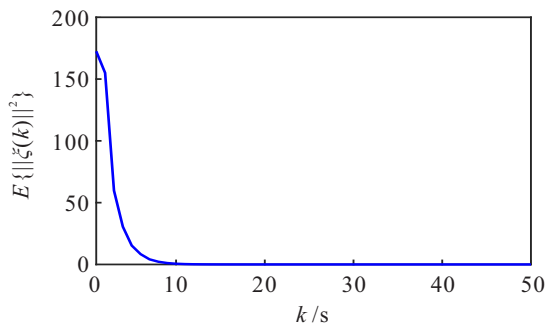


图4 闭环系统的有限增益 L_2 随机稳定性

0.4649, $\bar{p}_{22} = 0.8139$, $K_{11} = [0.0050, 0]$, $K_{21} = [0.2433, 0]$, $K_{12} = [0, 0.0065]$, $K_{22} = [0, 0.0034]$.

设 $w(k)$ 为随机生成的上界为 10 的扰动量, 则 $E\{\|z(k)\|^2\}$ 如图 4 所示. 由 $E\{\|z(k)\|^2\} < 25$ 可得, 总存在充分大的 $\gamma_0 > 0$ 和 $\gamma_w > 0$ 使得系统 (10) 是从 $w(k)$ 到 $z(k)$ 有限增益 L_2 随机稳定的.

3.2 直流电机装置

为与已有结果进行对比, 采用具有马尔可夫驱动电源故障的直流电机装置进行仿真研究. 如文献 [16] 所述, 马尔可夫跳变变量 $r(k) = i$ 表征由计算机产生的电源上的随机故障. 功率在 3 种模式之间跳转, 即 0% 旋转 ($r(k) = 1$), +20% 旋转 ($r(k) = 2$), -40% 旋转 ($r(k) = 3$).

令 $x(k) = [x_1(k); x_2(k); x_3(k)]$ 分别表示转子的角速度、电机消耗的电流和写为离散和的积分项, 矩阵 A_1 、 A_2 、 A_3 如文献 [16] 所述, 且 $B_{11} = [0.58705; 1.55010; 0]$, $B_{21} = [1.02851; 0.22282; 0]$, $B_{31} = [0.7874; 1.5302; 0]$, $B_{12} = B_{22} = B_{32} = 0.1I$, $C_1 = C_2 = C_3 = \text{diag}\{1, 1.2, 1.1\}$, $D = 0$.

设 $\alpha = 0.8$, $\Gamma = [0.95, 0.05, 0; 0.36, 0.6, 0.04; 0.1, 0.1, 0.8]$, 反馈矩阵 $K_{i1} = [0.2856, -0.4651, 0.0720]$, $K_{i2} = [1.8481, -1.0199, 0.0676]$, $K_{i3} = [0.1896, -0.4268, 0.0339]$, $\forall i \in \{1, 2, 3\}$.

当 $w(k) = 0$, $x_0 = [0.3 \quad -0.1 \quad 0.5]^T$, $\eta_{10} = 18$, $\eta_{20} = 15$, $\eta_{30} = 15$, $\theta = 0.01$, $\rho = 0.9$, $h = 0.01$ 时, 由于本文的驱动机制涉及 δ_i 和 η_i 两个可调变量, 在 50 s 内的驱动次数为 38, 小于文献 [16] 中的驱动次数 (50 s 内驱动 44 次). 此外, 由图 5 所示的系统状态可知, 丢包问题的引入导致系统状态震荡幅度大于文献 [16] 中的状态震荡幅度.

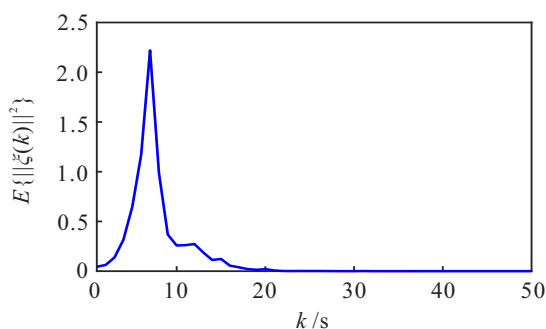


图 5 直流电机的随机稳定性

4 结论

本文讨论不可靠通信信道和有限带宽约束下 Markov 跳变系统的事件/时间驱动 H_∞ 控制问题, 保证了闭环系统在无扰动时随机稳定和在有扰动时有限增益 L_2 随机稳定. 虽然通过设计与 i 相关的增益

矩阵 $K_{\sigma_c(k)i}$ 减小了需要同时满足 LMI 的个数, 然而 LMI 之间的耦合关系导致求解过程依然复杂. 进一步简化控制器求解过程是后续工作的主要研究方向.

参考文献 (References)

- [1] Ren H L, Zong G D, Karimi H R. Asynchronous finite-time filtering of Markov jump nonlinear systems and its applications[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(3): 1725-1734.
- [2] Zhang L G, Prieur C. Stochastic stability of Markov jump hyperbolic systems with application to traffic flow control[J]. Automatica: Journal of IFAC, 2017, 86(C): 29-37.
- [3] Qi W H, Zhang N, Zong G D, et al. Event-triggered SMC for networked Markov jumping systems with channel fading and applications: Genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(10): 6503-6515.
- [4] 高倩, 高宪文, 齐文海. 带有执行器饱和的变时滞 Markovian 跳变系统的 DOBC 控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(9): 1857-1866.
(Gao Q, Gao X W, Qi W H. Disturbance-observer-based control for Markovian jump systems with time-varying delay and actuator saturation[J]. Control and Decision, 2019, 34(9): 1857-1866.)
- [5] 张端金, 王钟堃. 具有丢包的未知转移概率 Markov 跳变系统鲁棒 H_∞ 滤波[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2021, 42(6): 1-6.
(Zhang D J, Wang Z K. Robust H_∞ filtering for Markov jump systems with unknown transition probabilities and packet dropouts[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2021, 42(6): 1-6.)
- [6] Hua M G, Zhang F, Deng F Q, et al. H_∞ filtering for discrete-time periodic Markov jump systems with quantized measurements: A new packet loss compensation strategy[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(11): 6766-6777.
- [7] 林文娟, 何勇. 时滞半 Markov 跳变神经网络系统事件驱动故障检测滤波器设计[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(9): 1341-1350.
(Lin W J, He Y. Event-triggered fault detection filter design for semi-Markov jump neural networks with time delays[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(9): 1341-1350.)
- [8] 何苗, 董雪, 杨立昆. T-S 模糊时变延迟马尔科夫跳变系统的保性能事件驱动控制[J]. 宝鸡文理学院学报: 自然科学版, 2022, 42(1): 1-9.
(He M, Dong X, Yang L K. Guaranteed cost

- event-triggered control for T-S fuzzy time-varying delays Markov jump systems[J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences: Natural Science Edition, 2022, 42(1): 1-9.)
- [9] 谭天, 高金凤, 王锦霞, 等. 网络攻击下的Markov跳变系统有限时间控制[J]. 信息安全研究, 2021, 7(2): 145-154.
(Tan T, Gao J F, Wang J X, et al. Finite-time control of Markov jump systems under cyber-attacks[J]. Journal of Information Security Research, 2021, 7(2): 145-154.)
- [10] Ge X H, Han Q L, Wang Z D. A dynamic event-triggered transmission scheme for distributed set-membership estimation over wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(1): 171-183.
- [11] Wang J, Chen M S, Shen H, et al. A Markov jump model approach to reliable event-triggered retarded dynamic output feedback H_∞ control for networked systems[J]. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 2017, 26: 137-150.
- [12] Jiang B P, Karimi H R, Kao Y G, et al. Takagi-Sugeno model based event-triggered fuzzy sliding-mode control of networked control systems with semi-Markovian switchings[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2020, 28(4): 673-683.
- [13] Li Q, Shen B, Wang Z D, et al. Recursive distributed filtering over sensor networks on Gilbert-Elliott channels: A dynamic event-triggered approach[J]. Automatica, 2020, 113: 108681.
- [14] Dolk V S, Borgers D P, Heemels W P M H. Output-based and decentralized dynamic event-triggered control with guaranteed L_p -gain performance and zeno-freeness[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(1): 34-49.
- [15] 王佳伟, 崔一鸣, 王振华, 等. 切换系统 H_-/H_∞ 异步切换故障检测滤波器设计[J]. 控制与决策, 2017, 32(2): 223-231.
(Wang J W, Cui Y M, Wang Z H, et al. H_-/H_∞ asynchronous fault detection filter design for switched systems[J]. Control and Decision, 2017, 32(2): 223-231.)
- [16] Song J, Niu Y G, Xu J. An event-triggered approach to sliding mode control of Markovian jump lur'e systems under hidden mode detections[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(4): 1514-1525.

作者简介

闫晶晶(1985—), 女, 博士, 从事切换系统、量化编码控制及网络化控制等研究, E-mail: yanjingjing2009@163.com;

张梦宇(1998—), 女, 硕士生, 从事跳变系统的研究, E-mail: zmy169864@sina.com;

马运亮(1980—), 男, 高级工程师, 硕士, 从事嵌入式系统、滑模变结构控制及自动化应用等研究, E-mail: 15414643@qq.com.