

转移概率部分未知时滞跳变系统有限时间  $H_\infty$  控制

熊威, 顾德, 刘飞

(江南大学 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 时滞是许多工业系统的固有特性, 会导致系统控制性能的下降, 甚至影响系统稳定, 而在实际系统中, 有限时间系统的特性更值得关注; 针对上述情况, 对一类具有时滞的马尔科夫跳变系统有限时间控制器设计的问题进行了研究; 把转移概率完全已知的条件放宽至部分未知的更一般情形, 采用自由权重的方法, 保证所得的线性矩阵不等式具有更小的保守性; 首先, 给出马尔科夫跳变系统有限时间有界性、有限时间  $H_\infty$  有界性的判定准则; 然后, 通过对线性矩阵不等式 (LMIs) 求解, 获得状态观测器和状态反馈控制器的增益矩阵; 最后, 仿真实例验证所提算法的有效性。

**关键词:** 马尔科夫跳变系统; 时滞; 转移概率部分未知; 有限时间有界; 线性矩阵不等式

Finite-time  $H_\infty$  Control of Time-delayed Jumping Systems with Partial Unknown Transition Probabilities

Xiong Wei, Gu De, Liu Fei

(Ministerial Key Laboratory of Advanced Control for Light Industry Processes,  
Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Delay is an inherent characteristic of many industrial systems, which can lead to the decline of system control performance and even affect the stability of the system. In practical systems, the characteristics of finite-time systems deserve more attention. In view of the above situation, the design of finite-time controller for a class of Markov jump systems with time-delay is studied. By relaxing the condition that the transition probability is fully known to a more general case where the transition probability is partially unknown, the free weight method is adopted to ensure that the obtained linear matrix inequalities are less conservative. Firstly, the criteria of finite-time boundedness and finite-time  $H_\infty$  Boundedness for Markov jumping systems are given. Then, the gain matrix of the state observer and the state feedback controller is obtained by solving the linear matrix inequality (LMIs). Finally, a simulation example is given to verify the effectiveness of the proposed algorithm.

**Keywords:** Markovian jump systems; time-delays; partially known transition probabilities; finite-time boundedness; linear matrix inequalities

## 0 引言

由于环境的突变, 子系统间跳变等随机突变因素的影响, 传统切换系统很难描述上述随机跳变模型, 为了减弱上述随机突变对系统的影响, 可以用马尔科夫跳变系统模型来精确表示此类存在突变的数学模型。马尔科夫跳变系统具有广泛的应用背景, 该系统有两部分构成, 一部分是用离散时间或连续时间动力学模型来描述的子系统, 另一部分是马尔科夫链, 子系统的状态轨迹沿着此链在各个时间区间内进行随机的跳变。在电力系统、通讯系统、制造业系统

等<sup>[1]</sup>方面马尔科夫跳变系统彰显了强大的建模能力。近年来, 马尔科夫跳变系统已成为控制理论界热门的研究方向之一, 主要包括稳定性与控制器设计<sup>[2-5]</sup>, 系统故障检测与容错控制<sup>[3,6]</sup>, 滤波及状态估计<sup>[3,7,8]</sup>。

跳跃过程中转移概率很大程度上决定了系统的性能, 但是获取精确的转移概率是非常困难的, 在考虑转移概率部分未知的条件下, 已有大量文献对其进行了研究<sup>[9-12]</sup>。文献<sup>[10]</sup>针对转移概率部分未知的马尔科夫跳变系统鲁棒控制问题进行了研究。文献<sup>[11]</sup>研究了马尔科夫跳变系统的稳定性。文献<sup>[12]</sup>在转移概率部分未知, 执行器和传感器同时故障的条件下, 通过对系统故障同时估计方法, 设计了系统观测器和控制器。在很多实际工业系统中, 由于信号在传输过程中存在时延和测量不灵敏等因素, 时滞对于系统来说是不可避免存在的, 也是导致控制系统不稳定的因素之一。因此对于具有时滞, 状态转移不确定的跳变系统的稳定性分析具有重要意义并且也取得了很多成果<sup>[13-18]</sup>。

近几年来, 有限时间控制在工程实践中的应用越来越广泛, 而现有文献主要研究无限时域内的李雅普诺夫渐进

收稿日期: 2018-12-22; 修回日期: 2019-02-26。

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20180594)。

作者简介: 熊威(1994-), 男, 湖北省荆州市人, 硕士研究生, 主要从事马尔科夫跳变系统有限时间容错控制方向的研究。

顾德(1983-), 男, 江苏苏州人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事模式识别与智能系统等方向的研究。

刘飞(1965-), 男, 江苏南京人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事先进控制理论与应用、工业过程监测与诊断、工业过程综合自动化等方向的研究。

稳定性问题, 对于许多工业应用系统, 诸如飞行器的姿态控制、化学反应的温度控制、导弹跟踪控制而言, 我们更加关注的是动力系统在固定有限时间间隔上的行为即某段时间系统的特性, 例如, 当系统的控制回路存在饱和元件或者控制飞行器在一个特定时间区域内从一个点转移到另一个点的轨迹问题时, 都会遇到系统的有限时间稳定问题。而有限时间稳定性则可以很好的对此进行衡量。近几年对于有限时间稳定性控制问题引起了广泛关注<sup>[19-25]</sup>。

受以上分析启发, 本文讨论了在转移概率部分未知情况下的时滞马尔可夫跳变系统基于观测器的有限时间控制问题。主要目的是设计一种状态观测器和状态反馈控制器, 保证闭环系统随机有限时间的稳定性。主要分为以下三个部分来说明: 1) 对于时滞马尔可夫跳变系统进行有限时间稳定性分析, 考虑状态转移概率矩阵部分未知情况, 相较于基于精确状态转移概率矩阵的文献更具实用性; 2) 在进行系统控制器和观测器设计时, 由于分析过程中所得的线性矩阵不等式具有非线性项, 使用解耦技术来解决, 得到一组可以求解的线性矩阵不等式; 3) 通过求解得到的观测器增益和控制器增益矩阵, 进行 SIMULINK 仿真, 验证所提方法的有效性。

### 1 系统描述及准备工作

考虑如下的时滞时序马尔可夫跳变系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(r_t)x(t) + A_d(r_t)x(t-\tau) + B(r_t)u(t) + M(r_t)f(t) \\ \dot{z}(t) = C(r_t)x(t) + C_d(r_t)x(t-\tau) + D(r_t)u(t) + F(r_t)f(t) \\ \dot{y}(t) = C_y(r_t)x(t) + C_{yd}(r_t)f(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $x(t) \in \mathbf{R}^n, u(t) \in \mathbf{R}^m, y(t) \in \mathbf{R}^p, z(t) \in \mathbf{R}^q$  分别是系统的状态向量, 控制输入, 测量输出和被控输出,  $\tau$  是系统的时滞常数,  $f(t) \in \mathbf{R}^l$  系统时变不确定的有界未知输入信号, 包括扰动、噪声等, 不失一般性,  $\{r_t, t \geq 0\}$  是在有限集合  $R = \{1, 2, \dots, N\}$  中随时间  $t$  取值一个马尔可夫随机过程,  $r_t$  表示系统跳变模态, 转移概率矩阵定义为  $\Gamma = \{\pi_{ij}\}, i, j \in \mathbf{R}$ , 由  $t$  时刻的模态  $i$  转移到  $t + \Delta t$  时刻的模态转移概率为:

$$P_{ij} = \begin{cases} \pi_{ij}\Delta t + o(\Delta t), & i \neq j, \\ 1 + \pi_{ij}\Delta t + o(\Delta t), & i = j, \end{cases} \quad (2)$$

这里  $\Delta t > 0, \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} = 0$ , 对于  $\forall i, j \in \mathbf{R}, i \neq j$ , 有  $\pi_{ij} \geq 0$ , 并且满足  $\sum_{j=1, i \neq j}^N \pi_{ij} = -\pi_{ii}$ , 为了表示简洁, 当  $r(t) = i, i \in \mathbf{R}$  时, 记  $A(r_t)$  为  $A_i$ , 并依次类推。

假设外部扰动满足:

$$\int_0^T f^T(t)f(t)dt \leq d, d \geq 0 \quad (3)$$

本文考虑转移概率部分未知情况, 如某个含 4 个子系统的马尔可夫跳变系统可能具有如下转移概率:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \pi_{12} & \pi_{13} & ? & ? \\ ? & ? & \pi_{12} & \pi_{13} \\ \pi_{12} & ? & \pi_{13} & ? \\ ? & \pi_{13} & ? & ? \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于  $\forall i \in \mathbf{R}$ , 定义  $R = L_k^i + L_{ik}^i$ , 其中:

$$\begin{aligned} L_k^i &\triangleq \{j: \pi_{ij} \text{ 已知}, \text{ for } j \in \mathbf{R}\}, \\ L_{ik}^i &\triangleq \{j: \pi_{ij} \text{ 未知}, \text{ for } j \in \mathbf{R}\}. \end{aligned} \quad (5)$$

若  $L_k^i \neq \emptyset$ , 则可描述如下:

$$L_k^i = \{k_1^i, k_2^i, \dots, k_m^i\}, \quad 1 \leq m \leq n, \quad (6)$$

其中:  $k_m^i \in \mathbf{R}$ , 代表矩阵  $\Gamma$  中第  $i$  行中序号为  $k_m^i$  的第  $m$  个已知元素。

注 1 当  $L_k^i = \emptyset, L_{ik}^i = \mathbf{R}$ , 时, 就转化成了系统转移概率完全已知的情形; 当  $L_k^i = \emptyset, L_{ik}^i = \mathbf{R}$ , 时, 表示的是马尔科夫链的转移概率完全未知的特殊情况, 本文综合了以上 2 种情形, 研究了系统转移概率部分未知的一般情况。

对于系统 (1) 选取如下的时滞状态观测器和反馈控制器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A_i\hat{x}(t) + A_{di}\hat{x}(t-\tau) + B_iu(t) + H_i(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \dot{\hat{y}}(t) = C_{yi}\hat{x}(t) + C_{ydi}\hat{x}(t-\tau) \\ u(t) = K_i\hat{x}(t) + K_{di}\hat{x}(t-\tau) \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $\hat{x}(t)$  是状态  $x(t)$  的估计,  $K_i$  和  $H_i$  分别是待求的控制器增益和观测器增益, 定义状态估计误差  $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ , 定义  $\hat{x}(t) = [x^T(t) \quad e^T(t)]^T$ 。将系统 (1) 和所构造的观测器和控制器结合, 变换形式可得到增广跳变系统如下:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}_i\hat{x}(t) + \bar{A}_{di}\hat{x}(t-\tau) + \bar{M}_if(t) \\ \dot{z}(t) = \bar{C}_i\hat{x}(t) + \bar{C}_{di}\hat{x}(t-\tau) + F_if(t) \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} \bar{A}_i &= \begin{bmatrix} A_i + B_iK_i & -B_iK_i \\ 0 & A_i - H_iC_{yi} \end{bmatrix}, \bar{M}_i = \begin{bmatrix} M_i \\ M_i \end{bmatrix} \\ \bar{A}_{di} &= \begin{bmatrix} A_{di} + B_iK_{di} & -B_iK_{di} \\ 0 & A_{di} - H_iC_{ydi} \end{bmatrix}, \\ \bar{C}_i &= [C_i + D_iK_i \quad -D_iK_i], \\ \bar{C}_{di} &= [C_{di} + D_iK_{di} \quad -D_iK_{di}] \end{aligned}$$

本文的任务主要是在保证闭环系统在有限时间稳定的情况下, 设计系统 (8) 的  $H_\infty$  控制器和观测器, 使得系统满足一定的性能指标要求。同时, 以 LMI 的形式给出  $H_\infty$  控制率的存在条件以及观测器和控制器增益的求解方法。

在分析前给出以下定义和引理:

定义 1 (有限时间稳定性) 对于时滞跳变系统 (1), 给定三个正常数  $\sigma, \epsilon, T$  满足  $0 < \sigma < \epsilon$ , 和一组正定矩阵  $R(r_t)$ , 若对于  $\forall t_1 \in [-\tau, 0]$  和  $\forall t_2 \in [0, T]$ . 如下式子成立:

$$x^T(t_1)R(r_t)x(t_1) \leq c_1 \Rightarrow x^T(t_2)R(r_t)x(t_2) \leq c_2 \quad (9)$$

则系统 (1) 是关于  $\sigma, \epsilon, T, R(r_t), d$  有限时间镇定的。

定义 2 (有限时间  $H_\infty$  稳定性) 对于闭环系统 (8), 给定三个正常数  $\sigma, \epsilon, T$  满足  $0 < \sigma < \epsilon, T > 0$  和一组正定矩阵  $R(r_t)$ , 对于  $\forall t \in [0, T]$ , 若存在一个正常数  $\gamma > 0$ , 若增广系统满足如下要求:

(1) 当外部扰动满足 (3) 时, 增广跳变系统 (8) 有限时间镇定。

(2) 在零初始状态下, 跳变系统 (8) 控制输出  $z(t)$  满足:

$$\int_0^T z^T(t)z(t)dt < \gamma^2 \int_0^T f^T(t)f(t)dt. \quad (10)$$

则闭环系统 (8) 是关于  $\sigma, \varepsilon, T, R(r_i), d, H_\infty$  有限时间有界的。

引理 1 (Schur 补定理) 对于给定的对称正定矩阵,  $S =$

$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} < 0$ , 其中  $S$  是  $r \times r$  维的, 则有如下两个不等式成立且等价:

$$(1) \quad A < 0, D - CA^{-1}B < 0;$$

$$(2) \quad D < 0, A - BD^{-1}C < 0.$$

## 2 有限时间稳定性分析

在这一小节中主要对系统进行有限时间稳定性分析, 给出了闭环系统 (8) 有限时间稳定的充分条件, 并进行证明。

定理 1 时滞跳变系统 (1) 在状态观测器和反馈控制器 (7) 的条件下, 增广闭环系统 (8) 是关于  $c_1, c_2, T, \bar{R}_i, d$  有限时间镇定的。给定正常数  $T, \alpha, c_1, d$ , 对于任意  $i \in \mathbf{R}$ , 如果存在依赖于模态的正定矩阵  $\{\bar{P}_i, i \in \mathbf{R}\}$ , 对称正定矩阵  $\{\bar{E}_i, i \in \mathbf{R}\}$ , 正定对称矩阵  $\bar{Q}$ , 使得下列矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Xi_i & \bar{P}_i \bar{A}_{di} & \bar{P}_i \bar{M}_i \\ * & -\bar{Q} & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0, \quad (11)$$

$$P_j - E_i \leq 0, \quad j \in L_{ik}^i, \quad j \neq i, \quad (12)$$

$$P_j - E_i \geq 0, \quad j \in L_{ik}^i, \quad j = i, \quad (13)$$

$$c_1(\sigma_p + \varpi_Q) + \frac{\gamma^2 d}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T}) < e^{-\alpha T} c_2 \sigma_p \quad (14)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Xi_i &= \bar{P}_i \bar{A}_i + \bar{A}_i^T \bar{P}_i^T + \sum_{j \in L_i^i} \pi_{ij} (\bar{P}_j - \bar{E}_i) - \alpha \bar{P}_i + \bar{Q}, \\ \bar{P}_i &= \bar{R}_i^{-1} \bar{P}_i \bar{R}_i^{-1}, \quad \bar{Q}_i = \bar{R}_i^{-1} \bar{Q} \bar{R}_i^{-1} \\ \sigma_p &= \max_{i \in \mathbf{R}} \lambda_{\max}(P_i), \quad \sigma_Q = \max_{i \in \mathbf{R}} \lambda_{\max}(\bar{Q}_i), \end{aligned}$$

证明 构造如下的李雅普洛夫函数:

$$V(\hat{x}(t), i) = \hat{x}^T(t)P(i)\hat{x}(t) + \int_{t-\tau}^t x^T(s)\bar{Q}\hat{x}(s)ds. \quad (15)$$

求取  $V(\hat{x}(t), i)$  的弱无穷小算子, 由于对于任意的对称

矩阵  $\bar{E}_i$ , 都有  $\sum_{j=1}^N \pi_{ij} \bar{E}_i = 0$ , 可以得到:

$$LV(\hat{x}(t), i) = \hat{x}^T(t) *$$

$$\left[ \bar{P}_i \bar{A}_i + \bar{A}_i^T \bar{P}_i^T + \sum_{j \in L_i^i} \pi_{ij} (\bar{P}_j - \bar{E}_i) + \right.$$

$$\left. \sum_{j \in L_i^i} \pi_{ij} (\bar{P}_j - \bar{E}_i) + Q \right]$$

$$* \hat{x}(t) + f^T(t)M_i^T \bar{P}_i \hat{x}(t) + \hat{x}^T(t-\tau)\bar{A}_{di}^T \bar{P}_i \hat{x}(t) -$$

$$\hat{x}^T(t-\tau)\bar{Q}\hat{x}(t-\tau) + \hat{x}^T(t)\bar{P}_i M_i f(t) +$$

$$\hat{x}^T(t)\bar{P}_i \bar{A}_{di} \hat{x}(t-\tau). \quad (16)$$

$\bar{E}_i$  为自由权矩阵。这个新的矩阵的引入使得原有的放缩条件更加宽松, 降低了系统分析的保守性, 使得系统控

制效果更加显著。对 (11) 式左右两边乘以  $[\hat{x}(t)^T \hat{x}(t-\tau)^T f^T(t)]$  和它的转置。同时, 由于转移概率  $\pi_{ij} \geq 0$  ( $\forall i, j \in \mathbf{R}, i \neq j$ ) 和  $\pi_{ii} = -\sum_{j=1, j \neq i}^N \pi_{ij} < 0$ , ( $i \in \mathbf{R}$ ), 将转移概率分为已知和未知两部分来处理, 若  $i \in L_k^i$  (对角线元素已知), 则根据 (11) 和 (12) 结合上式 (16) 可以得到:

$$LV(\hat{x}(t), i) \leq \alpha V(\hat{x}(t), i) + \gamma^2 f^T(t)f(t). \quad (17)$$

若  $i \in L_{ik}^i$  (对角线元素未知), 则根据 (11) 和 (13) 可知上式 (17) 任然成立。(17) 两边同时乘以  $e^{-\alpha t}$  得到:

$$L[e^{-\alpha t} V(\hat{x}(t), i)] \leq e^{-\alpha t} \gamma^2 f^T(t)f(t). \quad (18)$$

对于  $\forall t \in [0, T]$ , 对上式 (18) 从 0 到  $T$  进行积分, 可以得到如下不等式成立:

$$e^{-\alpha T} V(\hat{x}(T), i) \leq V(\hat{x}_0, t_0) + \gamma^2 \int_0^T e^{-\alpha s} f^T(s)f(s)ds. \quad (19)$$

从式子 (19), 可以看出:

$$V(\hat{x}(T), i) = \hat{x}^T(T)P\hat{x}(T) \leq$$

$$e^{\alpha T} \left[ c_1(\sigma_p + d\sigma_Q) + \frac{\gamma^2 d}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T}) \right] \quad (20)$$

此外由于  $\bar{P}_i = \bar{R}_i^{-1} \bar{P}_i \bar{R}_i^{-1}$ , 并且定义  $\bar{P}_i$  的最大特征值和最小特征值分别为  $\sigma_p, \sigma_p$ ,  $\bar{Q}_i$  的最大特征值和最小特征值分别为  $\sigma_Q, \sigma_Q$  可以得到:

$$V(\hat{x}(t), i) = \hat{x}^T(t)\bar{P}_i \hat{x}(t) \geq \sigma_p \hat{x}^T(t)\bar{R}_i \hat{x}(t)$$

从而:

$$\hat{x}^T(t)\bar{R}_i \hat{x}(t) \leq \frac{e^{\alpha T} \left[ c_1(\sigma_p + d\sigma_Q) + \frac{\gamma^2 d}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T}) \right]}{\sigma_p} \quad (21)$$

由不等式 (21) 可以得到, 对于  $\forall t \in [0, T]$  若  $\hat{x}^T(t)\bar{R}_i \hat{x}(t) < c_2$  成立。由定义 1 知, 系统有限时间稳定, 定理 1 得证。

定理 2 时滞跳变系统 (1) 在状态观测器和反馈控制器 (7) 的条件下, 增广闭环系统 (8) 是关于  $c_1, c_2, T, \bar{R}(i), d, H_\infty$  有限时间镇定的, 且具有  $H_\infty$  范数有界  $\gamma$ 。对于给定正常数  $T, \alpha, c_1, d$  对于任意  $i \in \mathbf{R}$ , 如果存在常数  $\gamma > 0, c_2 > 0$ , 受限于模态的正定矩阵  $\{\bar{P}_i, i \in \mathbf{R}\}$ , 受限于模态的对称正定矩阵  $\{\bar{E}_i, i \in \mathbf{R}\}$  和对称正定矩阵  $\bar{Q}$ , 使得式 (12) (13) (14) 和下列矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Xi_i + \bar{C}_i^T \bar{C}_i & \bar{P}_i \bar{A}_{di} + \bar{C}_i^T \bar{C}_{di} & \bar{P}_i \bar{M}_i + \bar{C}_i^T \bar{F}_i \\ * & -\bar{Q} + \bar{C}_{di}^T \bar{C}_{di} & \bar{C}_{di}^T \bar{F}_i \\ * & * & -\gamma^2 I + \bar{F}_i^T \bar{F}_i \end{bmatrix} < 0, \quad (22)$$

证明 在零初始条件下, 对于增广系统 (8), 选取李雅普诺夫函数:

$$V(\hat{x}(t), i) = \hat{x}^T(t)P(i)\hat{x}(t) + \int_{t-\tau}^t x^T(s)\bar{Q}\hat{x}(s)ds.$$

根据 Schur 定理, 式子 (22) 可以等价于:

$$\begin{bmatrix} \Xi_i & \bar{P}_i \bar{A}_{di} & \bar{P}_i \bar{M}_i \\ * & -\bar{Q} & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C}_i^T \\ \bar{C}_{di}^T \\ \bar{F}_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{C}_i & \bar{C}_{di} & \bar{F}_i \end{bmatrix} < 0 \quad (23)$$

由于:

$$\begin{bmatrix} \bar{C}_i^T \\ \bar{C}_{di}^T \\ \bar{F}_i^T \end{bmatrix} [\bar{C}_i \quad \bar{C}_{di} \quad \bar{F}_i] \geq 0 \quad (24)$$

可以看出:

$$\begin{bmatrix} \Xi_i & \bar{P}_i \bar{A}_{di} & \bar{P}_i \bar{M}_i \\ * & -Q & 0 \\ * & * & \gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (25)$$

系统 (8) 是有限时间镇定的。此外对于系统 (8), 根据不等式 (12) (13) (22) 可以得到:

$$LV(\hat{x}(t), i) \leq \alpha V(\hat{x}(t), i) + \gamma^2 f^T(t) f(t) - z^T(t) z(t). \quad (26)$$

上式两边同时乘以  $e^{-\alpha t}$ , 可以得到:

$$L(e^{-\alpha t} V(\hat{x}(t), i)) \leq e^{-\alpha t} [\gamma^2 f^T(t) f(t) - z^T(t) z(t)]. \quad (27)$$

在零初始条件下, 对上式积分可得:

$$e^{-\alpha T} V(\hat{x}(T), i) \leq \int_0^T e^{-\alpha s} [\gamma^2 f^T(s) f(s) - z^T(s) z(s)] ds. \quad (28)$$

由上式可得:

$$\int_0^T e^{-\alpha s} z^T(s) z(s) ds \leq \gamma^2 \int_0^T e^{-\alpha s} f^T(s) f(s) ds. \quad (29)$$

对于  $\forall t \in [0, T]$ , 取  $\tilde{\gamma} = \sqrt{e^{\alpha T}} \gamma$  保证有限时间  $H_\infty$  性能指标 (10), 证毕。

从定理 1 可知, 对于上文选取的合适的李亚普洛夫函数, 不等式 (11) (12) (13) (14) 保证了闭环系统 (8) 有限时间稳定性。若在不考虑干扰的情况下, 不等式 (22) 就退化成不等式 (11), 进一步说明, 满足定理 2 的控制器和观测器不仅满足一定的  $H_\infty$  性能指标, 也能保证系统有限时间的稳定性。

由于定理 2 存在非线性乘积耦合项, 这就需要在前文假设的条件下, 在进行观测器和控制器设计时, 应用引理, 得到消去非线性项的线性矩阵不等式。

### 3 系统控制器和观测器设计

上一小节给出了系统有限时间稳定的充分条件, 但所提出的线性矩阵不等式存在非线性项, 这一小节中对于耦合项进行处理, 进行系统控制器和观测器设计, 得到一组可以求解控制器增益和观测器增益的线性矩阵不等式。

定理 3: 给定正常数  $T, \alpha, c_1, d$ , 时滞跳变系统 (1) 在状态观测器和反馈控制器 (7) 的条件下, 增广闭环系统 (8) 是关于  $c_1, c_2, T, \bar{R}_i, d$  有限时间状态反馈镇定的, 具有  $H_\infty$  范数有界  $\gamma$ , 且系统反馈控制增益为  $K_i = Y_i X_i^{-1}$ , 观测器增益为  $H_i = -X_i C_{i1}^T$ 。如果存在两个正常数  $c_2, \gamma$ , 正定对称矩阵  $Q$ , 受限于模态的正定对称矩阵  $\{L_i, i \in \mathbf{R}\}$ , 正定矩阵  $\{X_i, i \in \mathbf{R}\}$  和矩阵  $K_i, Y_i$ , 以及正定对称矩阵  $\{Q_i(i), i \in \mathbf{R}\}, \{Q_2(i), i \in \mathbf{R}\}$ , 使得如下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Omega_{1i} & \Phi_{1i} \\ \Phi_{1i}^T & \Psi_{1i} \end{bmatrix} < 0, \quad i \in L_k^i. \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} \Omega_{2i} & \Phi_{2i} \\ \Phi_{2i}^T & \Psi_{2i} \end{bmatrix} < 0, \quad i \in L_{ik}^i \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} -L_i & X_i \\ * & -X_j \end{bmatrix} < 0, \quad j \in L_{ik}^i, j \neq i \quad (32)$$

$$X_j - L_i > 0, \quad j \in L_{ik}^i, j = i \quad (33)$$

$$\sigma_1 R_i^{-1} < X_i < R_i^{-1} \quad (34)$$

$$0 < Q < \sigma_2 R_i \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} -e^{-\alpha T} c_2 + c_1 \varpi_2 + \frac{\gamma^2 d}{\alpha} (1 - e^{-\alpha T}) & \sqrt{c_1} \\ \sqrt{c_1} & -\sigma_1 \end{bmatrix} < 0 \quad (36)$$

其中:

$$\Omega_{1i} = \begin{bmatrix} \Theta_{1i} & -B_i Y_i & A_{di} + B_i K_{di} & -B_i K_{di} & M_i \\ * & N_{1i} & 0 & A_{di} - X_i C_{yi}^T C_{ydi} & M_i \\ * & * & -Q & 0 & 0 \\ * & * & * & -Q & 0 \\ * & * & * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix},$$

$$\Phi_{1i} = \begin{bmatrix} X_i C_i^T + Y_i^T D_i^T & 0 & S_{1i} & 0 \\ -Y_i^T D_i^T & X_i C_{yi}^T & 0 & S_{1i} \\ C_{di}^T + K_{di}^T D_i^T & 0 & 0 & 0 \\ -K_{di}^T D_i^T & 0 & 0 & 0 \\ M_i^T & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Omega_{2i} = \begin{bmatrix} \Theta_{2i} & -B_i Y_i & A_{di} + B_i K_{di} & -B_i K_{di} & M_i \\ * & N_{2i} & 0 & A_{di} - X_i C_{yi}^T C_{ydi} & M_i \\ * & * & -Q & 0 & 0 \\ * & * & * & -Q & 0 \\ * & * & * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix},$$

$$\Phi_{2i} = \begin{bmatrix} X_i C_i^T + Y_i^T D_i^T & 0 & S_{2i} & 0 \\ -Y_i^T D_i^T & X_i C_{yi}^T & 0 & S_{2i} \\ C_{di}^T + K_{di}^T D_i^T & 0 & 0 & 0 \\ -K_{di}^T D_i^T & 0 & 0 & 0 \\ M_i^T & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Psi_{1i} = \text{diag} \left\{ -I \quad \frac{1}{2} \quad -W_{1i} \quad -W_{1i} \right\},$$

$$\Psi_{2i} = \text{diag} \left\{ -I \quad \frac{1}{2} \quad -W_{2i} \quad -W_{2i} \right\}$$

$$\Theta_{1i} = X_i A_i^T + A_i X_i + B_i Y_i + Y_i^T B_i^T + \pi_{ii} X_i - \alpha X_i - \sum_{j \in L_i'} \pi_{ij} L_j$$

$$\Theta_{2i} = X_i A_i^T + A_i X_i + B_i Y_i + Y_i^T B_i^T - \alpha X_i - \sum_{j \in L_i'} \pi_{ij} L_j$$

$$N_{1i} = X_i A_i^T + A_i X_i + \pi_{ii} X_i - \alpha X_i - \sum_{j \in L_i'} \pi_{ij} L_j$$

$$N_{2i} = X_i A_i^T + A_i X_i - \alpha X_i - \sum_{j \in L_i'} \pi_{ij} L_j$$

$$S_{1i} = [\sqrt{\pi_{ik_1}'} X_i, \dots, \sqrt{\pi_{ik_{l-1}}'} X_i, \sqrt{\pi_{ik_{l+1}}'} X_i, \dots, \sqrt{\pi_{ik_m}'} X_i]$$

$$W_{1i} = -\text{diag} \{ X_{k_1} \dots X_{k_{l-1}}, X_{k_{l+1}} \dots X_{k_m} \}$$

$$S_{2i} = [\sqrt{\pi_{ik_1}'} X_i, \dots, \sqrt{\pi_{ik_m}'} X_i]$$

$$W_{2i} = -\text{diag} \{ X_{k_1} \dots X_{k_m} \}.$$

这里  $k_1^i, k_2^i, \dots, k_m^i$  是由 (6) 给定的, 并且  $k_r^i = i$ , 系统的状态反馈控制器增益为  $K_i = Y_i X_i^{-1}$ 。

证明 为了方便分析,取  $\bar{P}_i = \text{diag}\{P_i, P_i\}, Q = \text{diag}\{Q, Q\}, \bar{E}_i = \text{diag}\{E_i, E_i\}$ , 不等式 (22) 等价于:

$$\begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} & \theta_{14} & P_i M_i & C_i^T + K_i^T D_i^T \\ * & \theta_{22} & 0 & \theta_{24} & P_i M_i & -K_i^T D_i^T \\ * & * & -Q & 0 & 0 & C_{di}^T + K_i^T F_i^T \\ * & * & * & -Q & 0 & -K_i^T F_i^T \\ * & * & * & * & -\gamma^2 & F_i^T \\ * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (37)$$

其中:

$$\begin{aligned} \theta_{11} &= A_i^T P_i + P_i A_i + K_i^T B_i^T P_i + P_i B_i K_i + \sum_{j \in L_i^i} \pi_{ij} (P_j - E_i) - \alpha P_i, \\ \theta_{12} &= -P_i B_i K_i, \theta_{13} = P_i A_{di} + P_i B_i K_{di}, \theta_{14} = -P_i B_i K_{di}, \\ \theta_{22} &= A_i^T P_i + P_i A_i - C_{yi}^T H_i^T P_i - P_i H_i C_{yi} - \alpha P_i + \sum_{j \in L_i^i} \pi_{ij} (P_j - E_i), \\ \theta_{24} &= P_i A_{di} - P_i H_i C_{ydi}. \end{aligned} \quad (38)$$

注意到,  $\theta_{22}$  和  $\theta_{24}$  是非线性的, 存在乘积耦合项  $P_i$  和  $H_i$  都是需要待求的矩阵, 这里定义系统观测器增益矩阵  $H_i = P_i^{-1} C_{yi}^T$ , 则  $\theta_{22}$  和  $\theta_{24}$  等价于:

$$\begin{aligned} \theta_{24} &= P_i A_{di} - C_{yi}^T C_{ydi} \\ \theta_{22} &= A_i^T P_i + P_i A_i - 2C_{yi}^T C_{yi} - \alpha P_i + \sum_{j \in L_i^i} \pi_{ij} (P_j - E_i) \end{aligned}$$

式子 (37) 左右分别乘以对角阵  $\text{diag}\{P_i^{-1} \ P_i^{-1} \ I \ I \ I\}$ , 取  $X_i = P_i^{-1}, Y_i = K_i P_i^{-1}$  和  $L_i = P_i^{-1} E_i P_i^{-1}$  到, 当  $i \in L_k^i$  和  $i \in L_{ik}^i$  时由 Schur 引理很容易得到式子 (30) (31)。不等式 (12) (13) 两边分别乘以  $P_i^{-1}$  可以得到:

$$\begin{aligned} X_i X_j^{-1} X_i - L_i &< 0 \quad j \in L_{ik}^i, j \neq i, \\ X_j - L_j &> 0 \quad j \in L_{ik}^i, j = i. \end{aligned} \quad (41)$$

上式 (40) (41) 分别等价于 (32) (33)。

另一方面, 定义:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_i &= \hat{R}_i^+ \hat{X} \hat{R}_i^+, \tilde{Q}_i = \hat{R}_i^+ \hat{Q} \hat{R}_i^+, \\ \bar{X}_i &= R_i^+ X R_i^+, \bar{Q} = R_i^+ Q R_i^+ \end{aligned}$$

其中:  $\hat{X}_i = \text{diag}\{X_i \ X_i\}, \hat{R}_i = \text{diag}\{R_i \ R_i\}$ , 则有:

$$\begin{aligned} \sigma_X &= \max_{i \in L_i} \sigma_{\max}(\bar{X}_i) = \max_{i \in L_i} \sigma_{\max}(\tilde{X}_i), \\ \sigma_Q &= \max_{i \in L_i} \sigma_{\max}(\bar{Q}_i) = \max_{i \in L_i} \sigma_{\max}(\tilde{Q}_i) \\ \sigma_x &= \min_{i \in L_i} \sigma_{\min}(\bar{X}_i) = \min_{i \in L_i} \sigma_{\min}(\tilde{X}_i) \end{aligned}$$

由于  $R_i$  为正定对称矩阵, 并且  $\max_{i \in L_i} \sigma_{\max}(X_i) =$

$\frac{1}{\min_{i \in L_i} \sigma_{\min}(P_i)}$ , 那么条件 (14) 可以转化为:

$$\frac{c_1}{\sigma_x} + c_1 \varpi_Q + \frac{\gamma^2 d}{\alpha} (1 - e^{-\alpha T}) < \frac{e^{-\alpha T} c_2}{\sigma_X} \quad (42)$$

从条件 (34) 和 (35), 可以得到:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &< \sigma_x = \min_{i \in L_i} \sigma_{\min}(\tilde{X}_i), \sigma_X = \max_{i \in L_i} \sigma_{\max}(\tilde{X}_i) < 1, \\ \sigma_Q &= \max_{i \in L_i} \sigma_{\max}(\bar{Q}_i) \leq \sigma_2 \end{aligned}$$

将上面条件代入式子 (42), 则可得不等式 (36),

证毕。

对于四模态的时滞马尔科夫跳变系统 (1), 其系统参数为:

模型 1:

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} -1.5 & 1 \\ 2 & 3 \end{bmatrix}, A_{d1} = \begin{bmatrix} -0.5 & 0.2 \\ -0.1 & -0.2 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0.2 \\ -0.1 \end{bmatrix}, \\ M_1 &= \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix}, C_1 = [-1 \ 2], C_{y1} = [0.5 \ 2], F_1 = [-1] \\ C_{d1} &= [-0.1 \ 0.1], D_1 = [0.5], C_{yd1} = [0.1 \ -0.2]. \end{aligned}$$

模型 2:

$$\begin{aligned} A_2 &= \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 3 & -1 \end{bmatrix}, A_{d2} = \begin{bmatrix} -0.1 & 0.3 \\ -0.1 & 0.4 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.2 \end{bmatrix}, \\ M_2 &= \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix}, C_2 = [1 \ -1], C_{yd2} = [0.1 \ 0.1], F_2 = [0.5] \\ C_{d2} &= [0.3 \ 0.2], D_2 = [0.2], C_{y2} = [0.2 \ -1],. \end{aligned}$$

模型 3:

$$\begin{aligned} A_3 &= \begin{bmatrix} -3 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, A_{d3} = \begin{bmatrix} -0.2 & 0.4 \\ 0.3 & 0.1 \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.1 \end{bmatrix}, \\ M_3 &= \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix}, C_3 = [1 \ -1], C_{yd3} = [0.1 \ 0.1], F_3 = [0.8] \\ C_{d3} &= [0.3 \ 0.5], D_3 = [0.3], C_{y3} = [0.2 \ -2],. \end{aligned}$$

模型 4:

$$\begin{aligned} A_4 &= \begin{bmatrix} -1 & 2 \\ -2 & 1 \end{bmatrix}, A_{d4} = \begin{bmatrix} 0.2 & -0.3 \\ 0.1 & 0.4 \end{bmatrix}, B_4 = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.4 \end{bmatrix}, \\ M_4 &= \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix}, C_4 = [1 \ -1], C_{yd4} = [0.1 \ 0.1], F_4 = [0.7] \\ C_{d4} &= [1 \ 2], D_4 = [0.4], C_{y4} = [0.2 \ -1],. \end{aligned}$$

针对上述系统进行有限时间稳定性分析, 控制器和观测器设计。

### 4 实验结果与分析

选取系统参数  $c_1 = 0.25; \alpha = 1.0; d = 1; T = 2; R_i = I; \tau = 0.5$ 。

假设系统的转移概率矩阵为:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} ? & 0.3 & ? & 0.4 \\ ? & -1 & ? & 0.4 \\ 0.8 & ? & -1.3 & ? \\ 0.2 & ? & ? & ? \end{bmatrix}$$

其中: ? 为系统转移概率未知部分, 运用 Matlab 的 LIM 工具箱, 求解线性矩阵不等式, 可以得到系统状态控制器增益和状态观测器增益如下:

$$\begin{aligned} K_1 &= [-3.1629 \ -5.5160], K_2 = [-3.0890 \ -5.6813] \\ K_3 &= [-1.1179 \ -2.7311], K_4 = [-3.3143 \ -4.0815] \\ K_{d1} &= [-0.1133 \ 0.1301], K_{d2} = [0.0108 \ -0.312] \\ K_{d3} &= [-0.1167 \ 0.1491], K_{d4} = [0.0491 \ -0.3328] \\ H_1 &= [1.0551 \ 1.0065]^T, H_2 = [2.9854 \ -3.4310]^T, \\ H_3 &= [1.9238 \ 1.4342]^T, H_4 = [5.0045 \ -5.7889]^T. \end{aligned}$$

对于上述算出的控制器增益和观测器增益, 使用 SIMU-

LINK 仿真, 选取系统噪声为方差 0.01 的白噪声, 仿真时间为 2 秒, 延时为 0.5 秒, 系统初始状态值为  $[2 \quad -9]^T$ , 则可以得到系统的模态转化图, 和状态响应仿真图。

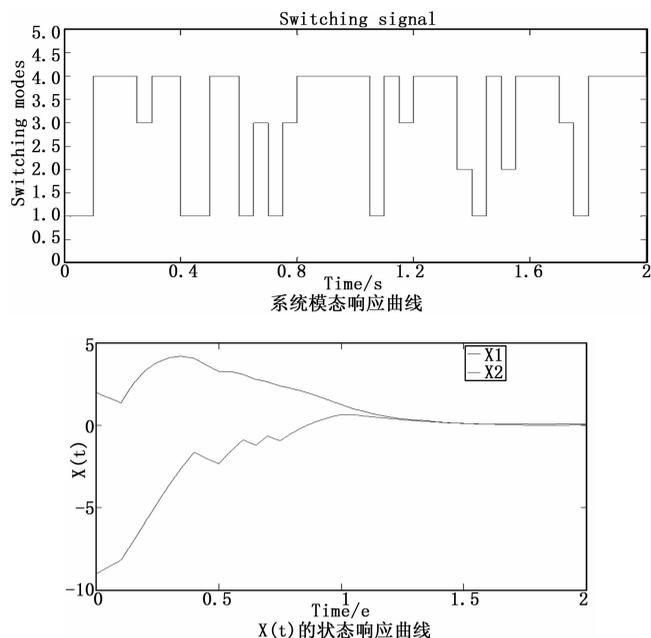


图 1 仿真图

从仿真图形中可以看出, 对于具有转移概率部分未知的时滞跳变系统, 所设计的控制器和观测器仍然可以保证系统 (1) 有限时间  $H_\infty$  稳定, 证明了所设计的状态反馈控制器和观测器是有效的。

## 5 结束语

本文研究了在一定性能指标约束条件下, 转移概率部分未知时滞马尔科夫跳变系统有限时间  $H_\infty$  控制问题, 通过扩展跳变系统状态, 将系统转换为具有跳变参数的广义描述系统, 针对此系统进行控制器设计, 保证系统有限时间稳定性。采用自由加权矩阵法, 处理转移概率部分未知情况, 保证所得线性矩阵不等式条件具有更小的保守性。最后, 通过 SIMULINK 仿真验证了所提算法的有效性。值得注意的是, 本文中考虑的是确定时滞对系统的影响, 针对于时变时滞情况, 这是后续需要研究的内容。

## 参考文献:

[1] Mahmoud M S, Shi P. Robust Kalman filtering for continuous time-lag systems with Markovian jump parameters [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2003, 50 (1): p. 98-105.

[2] Park B Y, Kwon N K, Park P. Stabilization of Markovian jump systems with incomplete knowledge of transition probabilities and input quantization [J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352 (10): p. 4354-4365.

[3] Liu M, Ho D W, Shi P. Adaptive fault-tolerant compensation control for Markovian jump systems with mismatched external disturbance [J]. Automatica, 2015, 58: 5-14.

[4] Wu L, Su X, Shi P. Output feedback control of Markovian jump repeated scalar nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59 (1): 199-204.

[5] Zhang Y, et al. Stabilization for Markovian jump systems with partial information on transition probability based on free-connection weighting matrices [J]. Automatica, 2011, 47 (1): 79-84.

[6] 王伟伟, 沈毅, 王振华. 切换系统的同时故障估计与容错控制 [J]. 控制理论与应用, 2017, 34 (1): 85-92.

[7] Li F, et al. State estimation and sliding mode control for semi-Markovian jump systems with mismatched uncertainties [J]. Automatica, 2015, 51: 385-393.

[8] Zhang Y, Lim C C, Liu F. Robust mixed  $H_2/H_\infty$  model predictive control for Markov jump systems with partially uncertain transition probabilities [J]. Journal of the Franklin Institute, 2018, 355 (8): 3423-3437.

[9] Shen M, Yang G H.  $H_2$  state feedback controller design for continuous Markov jump linear systems with partly known information [J]. International Journal of Systems Science, 2012, 43 (4): 786-796.

[10] 叶丹, 范泉涌. 转移概率部分已知的 Markov 跳变系统鲁棒  $H_2$  控制 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2013, 34 (2): 153-156.

[11] Zhang L, El-Kébir Boukas. Stability and stabilization of Markovian jump linear systems with partly unknown transition probabilities [J]. Automatica, 2009, 45 (2): 463-468.

[12] 李晓航, 朱芳来, 延迟不确定马尔科夫跳变系统的执行器和传感器故障同时估计方法 [J]. 自动化学报, 2017, 43 (1): 72-82.

[13] Hirasawa K, Mabu S, Hu J. Propagation and control of stochastic signals through universal learning networks [J]. Neural Networks, 2006, 19 (4): 487-499.

[14] Yan H, Qian F, Yang F, et al.  $H_\infty$  filtering for nonlinear networked systems with randomly occurring distributed delays, missing measurements and sensor saturation [J]. Information Sciences, 2016, 370-371: 772-782.

[15] Zhang S, Wang Z, Ding D, et al.  $H_\infty$  output-feedback control with randomly occurring distributed delays and nonlinearities subject to sensor saturations and channel fadings [J]. Journal of the Franklin Institute, 2014, 351 (8): 4124-4141.

[16] Hu J, Wang Z, Niu Y, et al. Sliding mode control for uncertain discrete-time systems with Markovian jumping parameters and mixed delays [J]. Journal of the Franklin Institute, 2014, 351 (4): 2185-2202.

[17] 何舒平, 刘飞. 基于观测器的不确定时滞 Markov 跳变系统  $H_\infty$  控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29 (12): 2117-2121.

[18] 陈海洋, 刘妹琴. 一类具有随机时滞的受扰马尔科夫跳变系统有限时间稳定性 [J]. 南京信息工程大学学报, 2017, 9 (4): 430-436.

[19] Mato F, Ariola M, Dorato P. Finite-time control of linear systems subject to parametric uncertainties and disturbances [J]. Automatica, 2001, 37 (9): 1459-1463.

[20] Liu Y, Ma Y, Wang Y. Reliable sliding mode finite-time control for discrete-time singular Markovian jump systems with

sensor fault and randomly occurring nonlinearities [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28 (2): 381-402.

- [21] 赵长钟, 栾小丽, 刘 飞. 基于有限频段的 Markov 跳变系统有限时间  $H_\infty$  滤波 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32 (3): 406-412.
- [22] 张维海. 随机马尔科夫跳跃系统有限时间控制 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32 (3): 334-340.
- [23] 几类跳变系统的有限时间稳定性分析与控制问题研究 [D].

(上接第 62 页)

### 2.5 远程控制模块软件设计

远程控制模块为用户提供远程测试控制手段, 本系统可通过以太网接口接入测试局域网, 通过调用 LabVIEW 中 TCP/IP 标准函数库实现了基于 TCP/IP 协议的远程数据采集用户配置、远程指令发送配置等<sup>[16]</sup>。

### 3 测试验证与分析

对本文中实现的高速多通道航天器通用测试系统进行了长时间测试验证, 系统表现稳定, 多通道采集数据能够实时准确的显示在主界面数据显示区中, 停止数据采集后, 128 通道的采集数据均能够成功保存在 TDMS 数据文件中且数据完整, 并且能够按照配置回放数据正常。同时, 指令控制模块能够按照主界面用户配置能够按照循环及指定 2 种模式按需进行指令输出控制。测试结果界面如图 9 所示。

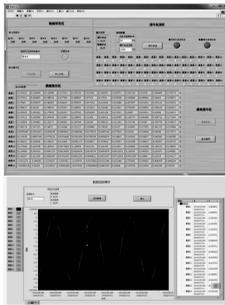


图 9 显示主界面及回放界面测试结果

通过使用本系统高速并行采集 128 路外部信号共 4 小时 20 分钟, 每块数据采集板卡的每通道均采集了 15428055 个数据, TDMS 数据详见图 10。

Root Node	Title	Author	Date/Time	Groups	Description
All	Channel	Description			
Channel	Bitrate	Unit	Length	Minimum	Maximum
0	15428055				
1	15428055				
2	15428055				
3	15428055				
4	15428055				
5	15428055				
6	15428055				
7	15428055				
8	15428055				
9	15428055				
10	15428055				
11	15428055				
12	15428055				
13	15428055				
14	15428055				
15	15428055				

图 10 TDMS 数据文件统计

本系统实现的实际总采样率如下:

- 成都: 电子科技大学, 2015.
- [24] Cheng J, Li G, Zhu H, et al. Finite-time  $H_\infty$  control for a class of Markovian jump systems with mode-dependent time-varying delays via new Lyapunov functionals [J]. Advances in Difference Equations, 2013, 2013 (1): 1-22.
- [25] Zhang Y, Shi Y, Shi P. Robust and non-fragile finite-time  $H_\infty$  control for uncertain Markovian jump nonlinear systems [J]. Applied Mathematics & Computation, 2016, 279 (C): 125-138.

$$\text{实际总采样率} = \frac{15428055}{4.3 \times 60 \times 60 \times 1000} \text{ kHz} = 0.997 \text{ kHz}$$

考虑到本测试系统的操作系统为非实时操作系统的 Windows 操作系统, 操作系统运行期间会有不可避免的系统进程插入。通过测试验证, 本测试系统实际总采样率 0.997 kHz 与设计值 1 kHz 采样率近乎一致, 表明数据采集、存储完整且无丢失, 系统工作稳定可靠。

### 4 总结

本文提出并实现的基于 LabVIEW 的高速多通道通用测试系统实现了最大 128 通道的高速并行数据采集、实时显示、存储回放、指令控制、网络接入与远程控制等功能。同时, 系统设计过程中充分考虑通用性及适用性设计, 可满足航天器多状态或暂态高速并行数据采集、存储、回放及分析的需求。通过长时间测试验证, 测试结果表明本测试系统工作稳定可靠, 功能及性能满足设计要求, 具有较高的实用价值。

#### 参考文献:

- [1] 王庆成. 航天器电测技术 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2005.
- [2] 闫金栋, 王华茂, 李大明, 等. 基于系统工程的航天器专业化测试模式探索与实践 [J]. 航天器工程, 2017, 26 (5): 99-107.
- [3] 赵忠凯, 尹 达, 刘海朝, 等. 高速多通道数据采集传输系统的设计 [J]. 火力与指挥控制, 2015, 12 (40): 136-140.
- [4] 蒋 薇, 张晓波, 赖青贵, 等. 基于 LabVIEW 的仪器通信技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (4): 1030-1032.
- [5] 甄国涌, 张传民, 齐 蕾, 等. 一种 182 路传感器数据采集电路的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (12): 4147-4153.
- [6] 李 超, 邱柯妮, 张伟功, 等. 基于 PCIE 总线主模式 DMA 高速数据传输系统设计 [J]. 电子技术应用, 2015, 41 (9): 141-145.
- [7] 王 俊, 郑 焱, 王 红, 等. 基于 DMA 的并行数字信号高速采集系统 [J]. 电子技术应用, 2010, 36 (3): 42-45.
- [8] 丰伟伟, 杨世文, 南金瑞, 等. LabVIEW 中 TDMS 文件和 SQL 数据库数据处理速度的研究 [J]. 仪器仪表与分析监测, 2011 (1): 10-12.
- [9] 李俊娇, 朱 磊, 等. 基于 LabVIEW 的采集数据快速文件存储方法 [J]. 西安工程大学学报, 2018, 32 (3): 311-315.
- [10] 吕红英, 吴先球, 陈俊芳. 用 LabVIEW 实现自制信号发生器的远程控制 [J]. 测控技术, 2004, 23 (10): 34-36.