

控制与决策

Control and Decision

具有输出约束的非线性互联大系统分散自适应容错控制

张骄阳, 樊慧津, 方新鹏, 刘磊, 王博, 王薇

引用本文:

张骄阳, 樊慧津, 方新鹏, 等. 具有输出约束的非线性互联大系统分散自适应容错控制[J]. *控制与决策*, 2025, 40(12): 3576–3586.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0385>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于移动传感器/执行器网络的时滞分布参数系统镇定控制

Stabilization control for a class of distributed parameter systems with time–delay based on mobile sensor and actuator networks
控制与决策. 2021, 36(8): 1955–1962 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1309>

带输入饱和的不确定非线性系统自适应模糊触发式补偿控制

Adaptive fuzzy trigger compensation control for uncertain nonlinear system with input saturation
控制与决策. 2021, 36(12): 3007–3014 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0907>

时变参数不确定离散时间系统的预见控制

Preview control for discrete–time polytopic time–varying systems
控制与决策. 2021, 36(12): 3074–3082 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0373>

基于神经动态优化的非线性系统近似最优跟踪控制

Approximate optimal tracking control for nonlinear systems based on neurodynamic optimization
控制与决策. 2021, 36(1): 97–104 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0056>

基于反演算法的严格反馈非线性系统固定时间跟踪控制

Fixed–time tracking control for strict–feedback nonlinear systems based on backstepping algorithm
控制与决策. 2021, 36(1): 173–179 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0658>

具有输出约束的非线性互联大系统分散自适应容错控制

张骄阳^{1,2}, 樊慧津^{1,2†}, 方新鹏^{1,2}, 刘磊^{1,2}, 王博^{1,2}, 王薇³

1. 华中科技大学 人工智能与自动化学院, 武汉 430074;
2. 华中科技大学 多谱信息处理技术国家级重点实验室, 武汉 430074;
3. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘要: 研究 Markov 跳变执行器故障下, 一类具有输出约束的不确定非线性互联大系统分散自适应跟踪控制器设计问题. 考虑到故障的间歇性、时变性和随机性, 引入一组时变的 Markov 变量描述子系统执行器故障. 首先, 构造一个双曲正切型辅助函数, 仅利用局部信息补偿强度未知的子系统耦合. 然后, 设计自适应机构估计未知故障的边界, 提出一种分散容错控制器; 同时, 运用输出变换策略对子系统输出施加约束, 与基于障碍 Lyapunov 函数的控制方法相比, 扩大了输出初值的取值范围. 所提出方案能够保证闭环系统中所有信号依概率有界, 且子系统输出不违反约束. 最后, 对由弹簧连接的双倒立摆系统进行仿真研究, 验证所提出控制方案的有效性.

关键词: 互联大系统; 自适应控制; 分散控制; 容错控制; Markov 跳变执行器故障; 输出约束

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyj.2025.0385

引用格式: 张骄阳, 樊慧津, 方新鹏, 等. 具有输出约束的非线性互联大系统分散自适应容错控制 [J]. 控制与决策, 2025, 40(12): 3576-3586.

Decentralized adaptive fault-tolerant control for nonlinear interconnected large-scale systems with output constraints

ZHANG Jiao-yang^{1,2}, FAN Hui-jin^{1,2†}, FANG Xin-peng^{1,2}, LIU Lei^{1,2}, WANG Bo^{1,2}, WANG Wei³

(1. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Multispectral Information Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: This article concerns the decentralized adaptive tracking controller design problem for a class of output-constrained uncertain nonlinear interconnected large-scale systems under Markov jump actuator faults. In view of the intermittence, time-variability and randomness of faults, a group of time-varying Markov variables is introduced to characterize the actuator faults in each subsystem. First, a hyperbolic tangent type auxiliary function is constructed to compensate subsystem interactions of unknown strengths by using local information only. Second, adaptive mechanisms are developed to estimate the bounds of unknown faults, and a decentralized fault-tolerant controller is proposed. Meanwhile, the output transformation strategy is used to constrain the subsystem output, thereby enlarging the range of the initial output value in comparison with the barrier Lyapunov function based control method. With the proposed scheme, all the closed-loop signals are bounded in probability and the output constraint is not violated in each subsystem. Finally, simulation studies are conducted on a double-inverted-pendulums system connected by a spring to demonstrate the effectiveness of the proposed control scheme.

Keywords: interconnected large-scale systems; adaptive control; decentralized control; fault-tolerant control; Markov jump actuator faults; output constraint

0 引言

许多复杂的工业控制系统 (如能源系统、机电系统和多体航天器) 可被建模为互联大系统的形式. 考

虑到传统的集中控制策略难以有效处理子系统耦合, 分散控制策略被广泛应用于互联大系统控制的领域. 所谓分散控制, 指的是针对各子系统, 仅利用其局部

收稿日期: 2025-04-14; 录用日期: 2025-08-27.

基金项目: 武汉市知识创新专项项目基础研究项目 (2023010201010055).

责任编辑: 孙宗耀.

†通信作者. E-mail: ehjfan@hust.edu.cn.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

信息而非整个互联大系统的全局信息进行子控制器设计,且各子控制器间是相互独立的.自20世纪80年代起,互联大系统的分散自适应控制便受到了Ioannou等^[1]和Hill等^[2]学者的关注.由于反步(backstepping)控制器具备结构清晰、暂态性能可调等优点,该设计方法被广泛应用于分散自适应控制中.Wen^[3]于1994年解决了互联大系统的分散自适应镇定问题;Zhou等^[4]于2008年解决了非线性互联大系统的分散自适应跟踪问题.更多相关的近期研究成果可参见文献[5-8].

上文提及的有关互联大系统分散自适应控制的结果均未考虑潜在的执行器故障.自适应容错控制是一种典型的主动容错控制方法,其思想是利用控制器的在线调节能力来处理未知故障引发的模型参数和结构的不确定性^[9].文献[10]针对不确定线性系统,提出了基于模型参考自适应方案的容错控制策略;后续,文献[11]借助自适应反步技术,将文献[10]中的结果推广到非线性系统中;文献[12]研究了执行器故障下,一类不确定混沌系统的自适应同步和反同步问题;文献[13]研究了具有输入饱和和输出约束的主动悬架系统的自适应容错控制问题.与单回路控制系统相比,互联大系统的容错控制问题更具挑战性,这是因为子系统耦合的存在会使得执行器故障对子系统状态带来的影响扩散到整个大系统中.文献[14]和文献[15]针对两类互联大系统提出了相应的分散自适应容错控制策略,在保证闭环系统中的所有信号半全局一致最终有界的同时,每个子系统输出的跟踪误差能够收敛至一个可调的残差集内.

值得注意的是,文献[10-15]均假设所有执行器的工作模态在一个有限的时间 T_f 后不再改变.事实上,执行器的故障可能会随着时间的推移发生无穷多次;文献[16]和文献[17]分别基于模块化反步设计方法和调节函数方法,研究了无穷多次执行器故障下不确定非线性系统的自适应容错控制问题;鉴于故障的间歇性和随机性,文献[18-20]引入了多个独立的Markov变量来表示执行器故障并进行自适应容错控制设计,以保证Markov跳变执行器故障下闭环系统中的所有信号依概率有界.然而,文献[18-20]均假定用于描述故障过程的Markov变量切换到一个特定的模态后,其取值为常数.另外,尽管不少针对单回路控制系统设计的自适应容错控制策略已被推广至互联大系统,但是,绝大多数现有的结果仅考虑执行器故障为有限次的情况^[14-15, 21-23].如何针对互联大系统中具有时变特性的Markov跳变执

行器故障,设计分散自适应容错控制方案尚需进一步研究.

另一方面,除补偿控制系统中的执行器故障,保证输出不违反约束条件也有利于提高控制系统的可靠性和安全性.针对不确定非线性互联大系统,文献[24]和文献[25]分别基于障碍Lyapunov函数(BLF)设计了分散自适应容错控制律,使得执行器故障下闭环系统的稳定性能够得到保证的同时,每个子系统的输出均满足约束条件.尽管基于BLF的控制策略是处理输出约束问题中十分常用的方法,但是该方法对于系统初值的限制较为严格,且需要虚拟控制器满足所谓的“可行性条件”.借助非线性映射直接对系统输出进行变换同样能够处理输出约束问题^[26-27],在互联大系统的分散自适应容错控制中具备一定的应用前景.

基于以上讨论,本文致力于解决Markov跳变执行器故障下,具有输出约束的不确定非线性互联大系统自适应容错控制问题,主要内容如下.

1) 通过构造一个新颖的双曲正切型辅助函数和相应的参数更新律,仅利用局部信息妥善地处理子系统间强度未知的耦合.区别于大多数现有结果(如文献[7, 14-15, 21-23, 25]),所设计分散自适应控制器不需要神经网络或模糊逼近,一方面使得控制器的实现更加简洁,另一方面能够保证闭环系统的全局随机稳定性.

2) 解决执行器随机故障下不确定非线性互联大系统的分散自适应容错控制问题.与文献[18-20]不同的是,Markov跳变执行器故障发生时,其效率因子和偏置均为时变的.构造一组与执行器故障相关的变量,并借助对其边界的估计设计容错控制律,实现对具有时变特性的Markov跳变执行器故障的自适应补偿.

3) 通过对子系统输出进行非线性变换,保证执行器故障下每个子系统的输出满足约束条件,且与基于BLF的控制方法相比,放宽了对系统初值的限制条件,移除了对虚拟控制的可行性条件.

4) 建立闭环系统随机稳定性的充分条件,严格地验证了闭环系统中所有信号的依概率有界性.与文献[18-20]相比,所建立充分条件放宽了对部分设计参数的依赖.

1 记号和预备知识

1.1 记号

为表述简洁,采用 \mathbb{R} 表示全体实数, \mathbb{R}_+ 表示全体非负实数, \mathbb{R}^n 表示 n 维实欧氏空间, $\mathbb{R}^{n \times m}$ 表示 $n \times$

m 维实矩阵空间. \mathbb{Z}_+ 为全体正整数. $(\Omega, \mathcal{F}, \{\mathcal{F}_t\}_{t \geq 0}, P)$ 为某一概率空间. 其中: Ω 为样本空间, \mathcal{F} 为 σ 域, $\{\mathcal{F}_t\}_{t \geq 0}$ 为滤子 (filtration), P 为概率测度. $\mathcal{C}^{1,1}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+ \times S^m; \mathbb{R}_+)$ 为定义在 $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+ \times S^m$ 上的全体非负函数 $V(\mathbf{x}, t, \mathbf{r}(t))$, 这里 $V(\mathbf{x}, t, \mathbf{r}(t))$ 关于自变量 \mathbf{x} 和 t 连续可微. 任取 $a, b \in \mathbb{R}$, 定义 $a \wedge b = \min\{a, b\}$, $a \vee b = \max\{a, b\}$; 任取 $P \in \mathbb{R}$ (或 $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^n$), 令 \hat{P} (或 $\hat{\mathbf{P}}$)、 \tilde{P} (或 $\tilde{\mathbf{P}}$) 分别为其估计值、估计误差, 且满足 $\tilde{P} = P - \hat{P}$ (或 $\tilde{\mathbf{P}} = \mathbf{P} - \hat{\mathbf{P}}$). 任取 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\lambda_{\max}(A)$ 为 A 的最大特征值.

1.2 具有多 Markov 变量的非线性系统的基础理论

考虑一类具有多 Markov 变量的 n 阶非线性微分方程, 如下所示:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = f(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{r}(t)), \quad t \geq 0. \quad (1)$$

其中: $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ 为系统状态; $\mathbf{r}(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_m(t)]$ 为一向量 Markov 过程, 其分量 $r_i(t)$ 为定义在某一概率空间 $(\Omega, \mathcal{F}, \{\mathcal{F}_t\}_{t \geq 0}, P)$ 上右连续、齐次、不可约的标量 Markov 过程, 与分量 $r_j(t) (i \neq j)$ 独立, 且取值于有限集 $S = \{1, 2, \dots, N_S\}$, 其转移概率矩阵 $\mathcal{P} = [P_{pq}]_{(N_S \times N_S)}$ 对于任意 $\Delta t > 0$ 和 $p, q \in S$ 满足

$$P_{pq} = P\{r_i(t + \Delta t) = q | r_i(t) = p\} = \begin{cases} \gamma_{pq}\Delta t + \mathcal{O}(\Delta t), & p \neq q; \\ 1 + \gamma_{pp}\Delta t + \mathcal{O}(\Delta t), & p = q. \end{cases}$$

任取 $p \neq q$, $\gamma_{pq} \in \mathbb{R}_+$ 为标量 Markov 过程从模态 p 转移到模态 q 的速率, 且 $\gamma_{pp} = -\sum_{p \neq q} \gamma_{pq}$; $f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+ \times S^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ 为关于 \mathbf{x} 局部 Lipschitz 的非线性函数, 即任取 $k \in \mathbb{Z}_+$, 总存在正常数 H_k , 使得对于任意 $t \in [0, T]$ 和 $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_m] \in S^m$, 有^[28]

$$|f(\mathbf{a}, t, \mathbf{p}) - f(\mathbf{b}, t, \mathbf{p})|^2 \leq H_k |\mathbf{a} - \mathbf{b}|^2, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$ 且 $|\mathbf{a}| \vee |\mathbf{b}| \leq k$.

1.2.1 弱无穷小生成元的定义和性质

引理 1^[18] 当向量 Markov 过程 $\mathbf{r}(t)$ 处于模态 $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_m]$ 时, 标量函数 $V(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{r}(t)) \in \mathcal{C}^{1,1}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+ \times S^m; \mathbb{R}_+)$ 沿着式 (1) 的弱无穷小生成元为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}V(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{r}(t)) = & V_t(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{p}) + V_x(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{p})f(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{p}) + \\ & \sum_{k=1}^m \sum_{q_k=1}^{N_S} \gamma_{p_k q_k} V(\mathbf{x}(t), t, p_1, \dots, q_k, \dots, p_m). \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} V_t(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{p}) &= \frac{\partial V(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{p})}{\partial t}, \\ V_x(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{p}) &= \left[\frac{\partial V(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{p})}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial V(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{p})}{\partial x_n} \right]. \end{aligned}$$

引理 2^[18] $V(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{r}(t))$ 和 $\mathcal{L}V(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{r}(t))$ 的数学期望满足

$$\begin{aligned} E\{V(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{r}(t))\} = & \sum_{p_1=1}^{N_S} \dots \sum_{p_m=1}^{N_S} E\{V(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{p})\} \pi_{p_1} \dots \pi_{p_m}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} E\{\mathcal{L}V(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{r}(t))\} = & \sum_{p_1=1}^{N_S} \dots \sum_{p_m=1}^{N_S} E\{\mathcal{L}V(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{p})\} \pi_{p_1} \dots \pi_{p_m}. \end{aligned} \quad (5)$$

其中: 式 (4) 和 (5) 中涉及的数学期望均几乎必然有界; $\boldsymbol{\pi}_i = [\pi_{1i}, \pi_{2i}, \dots, \pi_{N_S, i}] (i = 1, 2, \dots, m)$ 为第 i 个标量 Markov 过程 $r_i(t)$ 的平稳分布, 满足 $\sum_{p_i=1}^{N_S} \pi_{p_i} = 1$ 和 $\pi_{p_i} > 0$.

1.2.2 稳定性判据

引理 3^[18] 已知系统 (1) 在 $[0, +\infty)$ 上几乎必然存在唯一解 $\mathbf{x}(t)$. 若存在正定、渐小、径向无界的标量函数 $V(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{r}(t)) \in \mathcal{C}^{1,1}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+ \times S^m; \mathbb{R}_+)$ 和正常数 δ_c , 使得

$$E\{V(\mathbf{x}(t), t, \mathbf{r}(t))\} \leq \delta_c \quad (6)$$

成立, 则对于任意初始条件 $(\mathbf{x}(0), \mathbf{r}(0)) \in \mathbb{R}^n \times S^m$, 系统 (1) 的解 $\mathbf{x}(t)$ 依概率有界.

1.3 不等式引理

引理 4^[25] 任取 $a \in \mathbb{R}$ 和 $\epsilon > 0$, 有

$$0 \leq |a| - a \tanh\left(\frac{a}{\epsilon}\right) \leq 0.2785\epsilon. \quad (7)$$

引理 5 任取实数 $0 < r < s$, 若随机变量 ξ 的 s 阶原点矩存在, 则有

$$(E\{|\xi|^r\})^{\frac{1}{r}} \leq (E\{|\xi|^s\})^{\frac{1}{s}}. \quad (8)$$

2 问题描述

2.1 被控对象模型

考虑一类由 N 个子系统构成的不确定非线性互联大系统, 其第 i 个子系统的动力学方程为

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i,k}(t) &= x_{i,k+1}(t) + \boldsymbol{\theta}_i^T \boldsymbol{\phi}_{i,k}(\bar{\mathbf{x}}_{i,k}) + \Delta_{i,k}(\mathbf{y}), \\ & \quad k = 1, 2, \dots, n_i - 1; \\ \dot{x}_{i,n_i}(t) &= u_i(\mathbf{r}_i(t), t) + \boldsymbol{\theta}_i^T \boldsymbol{\phi}_{i,n_i}(\mathbf{x}_i) + \Delta_{i,n_i}(\mathbf{y}), \\ y_i(t) &= x_{i,1}(t), \quad i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $\mathbf{x}_i = [x_{i,1}, \dots, x_{i,n_i}]^T \in \mathbb{R}^{n_i}$, $u_i \in \mathbb{R}$ 和 $\mathbf{y}_i \in \mathbb{R}$ 分别为子系统的状态变量、实际的总体控制输入 (即

所有执行器输出的和)和输出, 且 $\bar{x}_{i,k} = [x_{i,1}, \dots, x_{i,k}]^T \in \mathbb{R}^k$, $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T \in \mathbb{R}^N$; $\boldsymbol{\theta}_i \in \mathbb{R}^{l_i}$ 为未知的常向量; $\phi_{i,k} : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^{l_i}$ 为局部 Lipschitz 连续的已知函数; $\Delta_{i,k} : \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$ 为局部 Lipschitz 连续的未知函数, 表示 N 个子系统间的耦合. 特别地, 子系统输出 y_i 需要被约束在紧集

$$\Omega_i = \{y_i \in \mathbb{R} \mid |y_i| < Y_i\} \quad (10)$$

内, 这里 Y_i 为一正常数, 由设计者根据具体的物理约束或安全要求选取.

假设 1 对于 $i = 1, 2, \dots, N$ 和 $k = 1, 2, \dots, n_i$, 子系统耦合 $\Delta_{i,k}(\mathbf{y})$ 满足

$$\Delta_{i,k}^2(\mathbf{y}) \leq \sum_{j=1}^N c_{i,k,j} \varphi_{i,k,j}^2(y_j). \quad (11)$$

其中: $c_{i,k,j} \in \mathbb{R}_+$ 为未知常数, 表征子系统间耦合的强度; $\varphi_{i,k,j}(\cdot)$ 为已知的光滑函数.

注 1 假设 1 表明第 i 个子系统中的耦合项以若干个与各子系统输出相关的光滑函数为界, 这实际上是互联大系统分散自适应控制中的一类基本假设, 其目的是通过交换求和顺序, 将第 i 个子系统中的耦合项转化为不依赖于其他子系统输出的形式. 一方面, 区别于文献 [3-5, 24], 假设 1 不要求表征子系统耦合强度的参数 $c_{i,k,j}$ 是已知的, 因此更具有一般性; 另一方面, 不同于文献 [7, 14-15, 21-23, 25] 中借助神经网络或模糊逻辑系统对未知的非线性动态进行逼近, 本文后续将构造一个辅助函数来处理子系统耦合, 因此, 能够得到全局而非半全局稳定的结果.

2.2 执行器故障模型

考虑第 i 个子系统中潜在的 Markov 跳变执行器故障, m_i 个待设计的控制输入 $v_{i,j}(t) (j = 1, 2, \dots, m_i; m_i \geq 2)$ 、第 j 个执行器的输出 $u_{i,j}(r_{i,j}(t), t)$ 与实际的总体控制输入 $u_i(\mathbf{r}_i(t), t)$ 间的关系为

$$u_i(\mathbf{r}_i(t), t) = \sum_{j=1}^{m_i} b_{i,j} u_{i,j}(r_{i,j}(t), t),$$

$$u_{i,j}(r_{i,j}(t), t) = \rho_{i,j}(r_{i,j}(t), t) v_{i,j}(t) + \varrho_{i,j}(r_{i,j}(t), t). \quad (12)$$

其中: $b_{i,j} \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ 为取值未知但是符号已知的控制系数; 记 $\mathbf{r}_i(t) = [r_{i,1}(t), \dots, r_{i,m_i}(t)]$ 为一向量 Markov 过程, 其分量 $r_{i,j}(t)$ 的性质与式 (1) 中 $\mathbf{r}(t)$ 的分量 $r_i(t)$ 一致; $\rho_{i,j}(r_{i,j}(t), t) \in [0, 1]$ 为第 j 个执行器未知且分段连续的效率因子; $\varrho_{i,j}(r_{i,j}(t), t) \in \mathbb{R}$ 为第 j 个执行器未知、有界、分段连续的偏置. 根据 $\rho_{i,j}(r_{i,j}(t), t)$ 和 $\varrho_{i,j}(r_{i,j}(t), t)$ 取值的不同组合, 将执行器的工作模式分为以下 4 种情况:

1) 若 $\rho_{i,j}(r_{i,j}(t), t) = 1$ 且 $\varrho_{i,j}(r_{i,j}(t), t) = 0$, 则表明该执行器处于正常工作模式;

2) 若 $\rho_{i,j}(r_{i,j}(t), t) \in [0, 1)$ 且 $\varrho_{i,j}(r_{i,j}(t), t) = 0$, 则表明该执行器失去 $(1 - \rho_{i,j}(r_{i,j}(t), t)) \times 100\%$ 的效率, 即受到失效故障的影响;

3) 若 $\rho_{i,j}(r_{i,j}(t), t) = 1$ 且 $\varrho_{i,j}(r_{i,j}(t), t) \neq 0$, 则表明该执行器受到偏置故障的影响;

4) 若 $\rho_{i,j}(r_{i,j}(t), t) \in [0, 1)$ 且 $\varrho_{i,j}(r_{i,j}(t), t) \neq 0$, 则表明该执行器同时受到失效和偏置故障的影响.

为保证闭环系统的能控性, 需要对执行器的工作状态施加一个基本假设.

假设 2 每个子系统中的 m_i 个执行器均不会同时完全失效, 即 $\sum_{j=1}^{m_i} |b_{i,j}| \rho_{i,j}(r_{i,j}(t), t) \geq \epsilon_{\text{ctrl},i}$ 对于 $i = 1, 2, \dots, N$ 成立, 其中 $\epsilon_{\text{ctrl},i}$ 为一个未知的正常数.

2.3 控制目标

本文的控制目标如下: 为具有 Markov 跳变执行器故障 (12) 和输出约束 (10) 的不确定非线性互联大系统 (9) 设计完全分散的自适应控制器 $v_{i,j} (i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, m_i)$, 使得:

- 1) 闭环系统中的所有信号依概率有界;
- 2) 子系统输出 y_i 尽可能地跟踪其参考信号 y_{ri} ;
- 3) 子系统输出 y_i 不违反约束条件.

为实现控制目标, 需要对参考信号 y_{ri} 做出以下假设.

假设 3 第 i 个子系统的参考信号 $y_{ri} \in \Omega_i$, 且其前 n_i 阶导函数已知、有界、分段连续.

3 控制器设计与稳定性分析

3.1 分散自适应容错控制器设计

首先, 为了对子系统输出 y_i 进行约束, 引入如下非线性变换:

$$\chi_{i,1} = \log \left(\frac{Y_i + y_i}{Y_i - y_i} \right), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (13)$$

易检验, 当 $y_i \rightarrow \pm Y_i$ 时, 有 $\chi_{i,1} \rightarrow \pm \infty$; 反之亦然. 因此, 若 $y_i(0) \in \Omega_i$ 且 $\chi_{i,1}$ 有界, 则对于任意 $t \geq 0$, 始终有 $y_i(t) \in \Omega_i$. 这便将输出约束问题直接转化为变量 $\chi_{i,1}$ 的有界性问题. 然后, 对于第 i 个子系统, 定义如下坐标变换:

$$z_{i,1} = \chi_{i,1} - \alpha_{i,0};$$

$$z_{i,k} = x_{i,k} - \alpha_{i,k-1}, \quad k = 2, 3, \dots, n_i. \quad (14)$$

其中: $\alpha_{i,0} = \log((Y_i + y_{ri})/(Y_i - y_{ri}))$, $\alpha_{i,k-1}$ 为待设计的虚拟控制.

step ($i, 1$): 变量 $z_{i,1}$ 的导函数为

$$\dot{z}_{i,1} = \mu_{i,1}(z_{i,2} + \alpha_{i,1} + \theta_i^T \phi_{i,1} + \Delta_{i,1}) - \mu_{i,0} \dot{y}_{ri}, \quad (15)$$

其中 $\mu_{i,0} := \partial \alpha_{i,0} / \partial y_{ri}$ 和 $\mu_{i,1} := \partial \chi_{i,1} / \partial y_i$ 为可计算函数 (computable function).

设计虚拟控制 $\alpha_{i,1}$ 为

$$\alpha_{i,1} = -\frac{1}{\mu_{i,1}} c_{i,1} z_{i,1} - \frac{\mu_{i,1}}{2} z_{i,1} + \frac{\mu_{i,0}}{\mu_{i,1}} \dot{y}_{ri} - \hat{\theta}_i^T \phi_{i,1} - \hat{h}_i s_i. \quad (16)$$

其中: $c_{i,1} > 0$ 为设计参数; h_i 为与子系统耦合相关的变量, s_i 为用于补偿子系统耦合的辅助函数, 二者形式将在后续给出.

构造第 $(i, 1)$ 个 Lyapunov 候选函数为

$$V_{i,1} = \frac{1}{2} z_{i,1}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_i^T \Gamma_i^{-1} \tilde{\theta}_i + \frac{1}{2\gamma_{h_i}} \tilde{h}_i^2. \quad (17)$$

其中: 自适应增益 $\gamma_{h_i} > 0$, $\Gamma_i > 0$.

由式 (14) ~ (16) 和不等式

$$\mu_{i,1} z_{i,1} \Delta_{i,1} \leq \frac{1}{2} \mu_{i,1}^2 z_{i,1}^2 + \frac{1}{2} \Delta_{i,1}^2,$$

可得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,1} \leq & -c_{i,1} z_{i,1}^2 + \mu_{i,1} z_{i,1} z_{i,2} - \tilde{\theta}_i^T \Gamma_i^{-1} (\dot{\tilde{\theta}}_i - \Gamma_i \tau_{i,1}) - \\ & \mu_{i,1} h_i s_i z_{i,1} - \frac{1}{\gamma_{h_i}} \tilde{h}_i (\dot{\tilde{h}}_i - \gamma_{h_i} \tau_{h_i}) + \frac{1}{2} \Delta_{i,1}^2. \end{aligned} \quad (18)$$

其中: $\tau_{i,1} = \mu_{i,1} z_{i,1} \phi_{i,1}$ 为第 $(i, 1)$ 个调节函数, $\tau_{h_i} = \mu_{i,1} s_i z_{i,1}$.

step $(i, 2)$: 变量 $z_{i,2}$ 的导函数为

$$\begin{aligned} \dot{z}_{i,2} = & z_{i,3} + \alpha_{i,2} + \theta_i^T \phi_{i,2} + \Delta_{i,2} - \sum_{m=1}^2 \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial y_{ri}^{(m-1)}} \times y_{ri}^{(m)} - \\ & \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial x_{i,1}} (x_{i,2} + \theta_i^T \phi_{i,1} + \Delta_{i,1}) - \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial \hat{\theta}_i} \dot{\hat{\theta}}_i - \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial \hat{h}_i} \dot{\hat{h}}_i. \end{aligned} \quad (19)$$

设计虚拟控制 $\alpha_{i,2}$ 为

$$\begin{aligned} \alpha_{i,2} = & -\left(c_{i,2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial x_{i,1}}\right)^2\right) z_{i,2} - \mu_{i,1} z_{i,1} + \\ & \sum_{m=1}^2 \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial y_{ri}^{(m-1)}} y_{ri}^{(m)} + \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial x_{i,1}} x_{i,2} + \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial \hat{h}_i} \dot{\hat{h}}_i - \\ & \hat{\theta}_i^T \left(\phi_{i,2} - \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial x_{i,1}} \phi_{i,1}\right) + \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial \hat{\theta}_i} \Gamma_i (\tau_{i,2} - c_{\theta_i} \hat{\theta}_i). \end{aligned} \quad (20)$$

其中: $c_{i,2} > 0$ 为设计参数, $\tau_{i,2} = \tau_{i,1} + z_{i,2}(\phi_{i,2} - (\partial \alpha_{i,1} / \partial x_{i,1}) \phi_{i,1})$ 为第 $(i, 2)$ 个调节函数.

构造第 $(i, 2)$ 个 Lyapunov 候选函数为

$$V_{i,2} = V_{i,1} + \frac{1}{2} z_{i,2}^2. \quad (21)$$

由式 (14)、(18) ~ (20) 和不等式

$$\begin{aligned} z_{i,2} \Delta_{i,2} & \leq \frac{1}{2} z_{i,2}^2 + \frac{1}{2} \Delta_{i,2}^2, \\ -z_{i,2} \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial x_{i,1}} \Delta_{i,1} & \leq \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial x_{i,1}}\right)^2 z_{i,2}^2 + \frac{1}{2} \Delta_{i,1}^2, \end{aligned}$$

可得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,2} \leq & -\sum_{m=1}^2 c_{i,m} z_{i,m}^2 + z_{i,2} z_{i,3} - \tilde{\theta}_i^T \Gamma_i^{-1} (\dot{\tilde{\theta}}_i - \Gamma_i \tau_{i,2}) + \\ & z_{i,2} \frac{\partial \alpha_{i,1}}{\partial \hat{\theta}_i} (\Gamma_i \tau_{i,2} - \Gamma_i c_{\theta_i} \hat{\theta}_i - \dot{\hat{\theta}}_i) + \Delta_{i,1}^2 + \frac{\Delta_{i,2}^2}{2} - \\ & \frac{1}{\gamma_{h_i}} \tilde{h}_i (\dot{\tilde{h}}_i - \gamma_{h_i} \tau_{h_i}) - \mu_{i,1} h_i s_i z_{i,1}. \end{aligned} \quad (22)$$

step (i, k) , $k = 3, 4, \dots, n_i$: 将虚拟控制 $\alpha_{i,k}$ 设计为

$$\begin{aligned} \alpha_{i,k} = & -\left(c_{i,k} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{k-1} \left(\frac{\partial \alpha_{i,k-1}}{\partial x_{i,m}}\right)^2\right) z_{i,k} - z_{i,k-1} + \\ & \sum_{m=1}^k \frac{\partial \alpha_{i,k-1}}{\partial y_{ri}^{(m-1)}} y_{ri}^{(m)} + \sum_{m=1}^{k-1} \frac{\partial \alpha_{i,k-1}}{\partial x_{i,m}} \times x_{i,m+1} + \\ & \frac{\partial \alpha_{i,k-1}}{\partial \hat{h}_i} \dot{\hat{h}}_i + \frac{\partial \alpha_{i,k-1}}{\partial \hat{\theta}_i} (\Gamma_i \tau_{i,k} - \Gamma_i c_{\theta_i} \hat{\theta}_i) - \\ & \hat{\theta}_i^T \left(\phi_{i,k} - \sum_{m=1}^{k-1} \frac{\partial \alpha_{i,k-1}}{\partial x_{i,m}} \phi_{i,m}\right) + \\ & \left(\sum_{m=2}^{k-1} z_{i,m} \frac{\partial \alpha_{i,m-1}}{\partial \hat{\theta}_i}\right) \Gamma_i \left(\phi_{i,k} - \sum_{m=1}^{k-1} \frac{\partial \alpha_{i,k-1}}{\partial x_{i,m}} \phi_{i,m}\right). \end{aligned} \quad (23)$$

其中: $c_{i,k} > 0$ 为设计参数, $\tau_{i,k} = \tau_{i,k-1} + z_{i,k}(\phi_{i,k} - \sum_{m=1}^{k-1} (\partial \alpha_{i,k-1} / \partial x_{i,m}) \phi_{i,m})$ 为第 (i, k) 个调节函数.

需要注意的是, 执行器故障使得第 (i, n_i) 步不同于标准的反步设计. 为自适应补偿 Markov 跳变执行器故障, 定义如下变量:

$$\begin{aligned} l_i(\mathbf{p}_i) & = \inf_{t \geq 0} \sum_{j=1}^{m_i} |b_{i,j}| \rho_{i,j}(r_{i,j}(t) = p_{i,j}, t), \\ \beta_i(\mathbf{p}_i) & = \frac{1}{l_i(\mathbf{p}_i)}, \\ g_i(\mathbf{p}_i) & = \beta_i(\mathbf{p}_i) \sup_{t \geq 0} \sum_{j=1}^{m_i} |b_{i,j}| \varrho_{i,j}(r_{i,j}(t) = p_{i,j}, t), \end{aligned} \quad (24)$$

其中 $\mathbf{p}_i = [p_{i,1}, \dots, p_{i,m_i}] \in S^m$. 为了简便, 下文中统一用下标 “ \mathbf{p}_i ” 表示 m_i 个标量 Markov 过程 $\mathbf{r}_i(t) = [r_1(t), \dots, r_{m_i}(t)]$ 处于模态 $\mathbf{p}_i = [p_{i,1}, \dots, p_{i,m_i}]$. 如: 当 $\mathbf{r}_i(t) = \mathbf{p}_i$ 时, 式 (24) 中定义的 3 个 Markov

变量将分别被记为 l_{i,p_i} 、 β_{i,p_i} 和 g_{i,p_i} .

注 2 从构造与 Markov 跳变执行器故障相关的随机变量的角度, 本文与文献 [18-20] 存在显著的区别. 这是因为本文考虑的 Markov 跳变执行器故障发生时, 其效率因子和偏置均为时变的. 对于文献 [18-20] 中考虑的具有常值效率因子和偏置的 Markov 跳变执行器故障, 设计自适应容错控制律的思路是将失效故障视为未知的常值控制系数进行处理, 将偏置故障视为未知的常值扰动进行处理. 然而, 文献 [18-20] 的设计思路并不适用于补偿具有时变特性的 Markov 跳变执行器故障. 考虑到故障的效率因子和偏置的有界性, 式 (24) 中定义了 3 个表征 Markov 跳变执行器故障参数边界的随机变量, 后续将借助对故障参数边界的估计进行容错控制设计.

构造第 (i, n_i) 个 Lyapunov 候选函数为

$$\begin{aligned} V_i &= V_{i,n_i} + V_i^F, \\ V_{i,n_i} &= \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{n_i} z_{i,m}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_i^T \Gamma_i^{-1} \tilde{\theta}_i + \frac{1}{2\gamma_{h_i}} \tilde{h}_i^2, \\ V_i^F &= \frac{l_{i,p_i}}{2\gamma_{\beta_i}} \tilde{\beta}_{i,p_i}^2 + \frac{l_{i,p_i}}{2\gamma_{g_i}} \tilde{g}_{i,p_i}^2, \end{aligned} \quad (25)$$

其中 $\gamma_{\beta_i}, \gamma_{g_i} > 0$ 为自适应增益.

由引理 1、式 (14)、(22)、(23) 和不等式

$$\begin{aligned} \sum_{k=2}^{n_i} z_{i,k} \Delta_{i,k} &\leq \frac{1}{2} \sum_{k=2}^{n_i} (z_{i,k}^2 + \Delta_{i,k}^2), \\ -\sum_{m=1}^{n_i-1} z_{i,n_i} \frac{\partial \alpha_{i,n_i-1}}{\partial x_{i,m}} \Delta_{i,m} &\leq \\ \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{n_i-1} \left(\left(\frac{\partial \alpha_{i,k-1}}{\partial x_{i,m}} \right)^2 \times z_{i,n_i}^2 + \Delta_{i,m}^2 \right), \end{aligned}$$

可得到

$$\begin{aligned} \mathcal{L}V_{i,p_i} &\leq \\ &-\sum_{m=1}^{n_i} c_{i,m} z_{i,m}^2 + \tilde{\theta}_i^T (\tau_{i,n_i} - \Gamma_i^{-1} \dot{\tilde{\theta}}_i) + \\ &\left(\sum_{m=2}^{n_i} z_{i,m} \frac{\partial \alpha_{i,n_i}}{\partial \hat{\theta}_i} \right) (\Gamma_i \tau_{i,n_i} - \Gamma_i c_{\theta_i} \hat{\theta}_i - \dot{\tilde{\theta}}_i) - \\ &\frac{1}{\gamma_{h_i}} \tilde{h}_i (\gamma_{h_i} \tau_{h_i} - \dot{\tilde{h}}_i) - \mu_{i,1} h_i s_i z_{i,1} - \\ &z_{i,n_i} \alpha_{i,n_i} + \sum_{m=1}^{n_i} \frac{n_i + 1 - m}{2} \Delta_{i,m}^2 - \frac{l_{i,p_i}}{\gamma_{\beta_i}} \times \\ &\tilde{\beta}_{i,p_i} \dot{\tilde{\beta}}_i - \frac{l_{i,p_i}}{\gamma_{g_i}} \tilde{g}_{i,p_i} \dot{\tilde{g}}_i + z_{i,n_i} \sum_{j=1}^{m_i} b_{i,j} \times \\ &(\rho_{i,j}(p_{i,j}, t) v_{i,j} + \varrho_{i,j}(p_{i,j}, t)) + \\ &\sum_{k=1}^{m_i} \sum_{q_i,k=1}^{N_S} \gamma_{p_{i,k}, q_{i,k}} V_i^F(p_{i,1}, \dots, q_{i,k}, \dots, p_{i,m_i}). \end{aligned} \quad (26)$$

设计参数估计 $\hat{\theta}_i$ 和 \hat{h}_i 的更新律为

$$\dot{\hat{\theta}}_i = \Gamma_i \tau_{i,n_i} - c_{\theta_i} \Gamma_i \hat{\theta}_i, \quad (27)$$

$$\dot{\hat{h}}_i = \gamma_{h_i} \tau_{h_i} - \gamma_{h_i} c_{h_i} \hat{h}_i, \quad (28)$$

其中 $c_{\theta_i}, c_{h_i} > 0$ 为设计参数.

设计控制律 $v_{i,j}$ 为

$$\begin{aligned} v_{i,j} &= \text{sign}(b_{i,j}) \left[\alpha_{i,n_i} \hat{\beta}_i \tanh \left(\frac{-\alpha_{i,n_i} \hat{\beta}_i z_{i,n_i}}{\varepsilon_{v_i}} \right) - \right. \\ &\left. \hat{g}_i \tanh \left(\frac{\hat{g}_i z_{i,n_i}}{\varepsilon_{v_i}} \right) \right], \quad j = 1, 2, \dots, m_i, \end{aligned} \quad (29)$$

其中 ε_{v_i} 为正常数.

由引理 4 以及变量 l_{i,p_i} 和 g_{i,p_i} 的定义, 可得到

$$\begin{aligned} z_{i,n_i} \sum_{j=1}^{m_i} b_{i,j} (\rho_{i,j}(p_{i,j}, t) v_{i,j} + \varrho_{i,j}(p_{i,j}, t)) &\leq \\ l_{i,p_i} \left(z_{i,n_i} \alpha_{i,n_i} \hat{\beta}_i \tanh \left(\frac{-\alpha_{i,n_i} \hat{\beta}_i z_{i,n_i}}{\varepsilon_{v_i}} \right) - \right. \\ &z_{i,n_i} \hat{g}_i \tanh \left(\frac{\hat{g}_i z_{i,n_i}}{\varepsilon_{v_i}} \right) + |z_{i,n_i}| g_{i,p_i} \Big) \leq \\ l_{i,p_i} (z_{i,n_i} \alpha_{i,n_i} \hat{\beta}_i + |z_{i,n_i}| \tilde{g}_{i,p_i} + 0.557 \varepsilon_{v_i}) &= \\ z_{i,n_i} \alpha_{i,n_i} - l_{i,p_i} z_{i,n_i} \alpha_{i,n_i} \tilde{\beta}_{i,p_i} + l_{i,p_i} |z_{i,n_i}| \tilde{g}_{i,p_i} + &0.557 l_{i,p_i} \varepsilon_{v_i}. \end{aligned} \quad (30)$$

设计参数估计 $\hat{\beta}_i$ 和 \hat{g}_i 的更新律为

$$\dot{\hat{\beta}}_i = -\gamma_{\beta_i} \alpha_{i,n_i} z_{i,n_i} - \gamma_{\beta_i} c_{\beta_i} \hat{\beta}_i, \quad (31)$$

$$\dot{\hat{g}}_i = \gamma_{g_i} |z_{i,n_i}| - \gamma_{g_i} c_{g_i} \hat{g}_i, \quad (32)$$

其中 $c_{\beta_i}, c_{g_i} > 0$ 为设计参数. 将式 (27) ~ (32) 代入 (26), 可得到

$$\begin{aligned} \mathcal{L}V_{i,p_i} &\leq \\ &-\sum_{m=1}^{n_i} c_{i,m} z_{i,m}^2 + c_{\theta_i} \tilde{\theta}_{i,p_i}^T \hat{\theta}_i + c_{h_i} \tilde{h}_i \hat{h}_i + l_{i,p_i} c_{\beta_i} \times \\ &\tilde{\beta}_{i,p_i} \dot{\tilde{\beta}}_i + l_{i,p_i} c_{g_i} \tilde{g}_{i,p_i} \dot{\tilde{g}}_i + \sum_{m=1}^{n_i} \frac{n_i + 1 - m}{2} \times \\ &\Delta_{i,m}^2 - h_i \mu_{i,1} s_i z_{i,1} + 0.557 l_{i,p_i} \varepsilon_{v_i} + \\ &\sum_{k=1}^{m_i} \sum_{q_i,k=1}^{N_S} \gamma_{p_{i,k}, q_{i,k}} V_i^F(p_{i,1}, \dots, q_{i,k}, \dots, p_{i,m_i}). \end{aligned} \quad (33)$$

对于由 N 个相互耦合的子系统构成的互联大系统, 构造其总体 Lyapunov 候选函数为

$$V = \sum_{i=1}^N V_i. \quad (34)$$

不妨假定在时刻 t , 用于描述执行器故障的 N 个向量 Markov 过程 $\mathbf{r}_{\text{tot}}(t) = [\mathbf{r}_1(t), \mathbf{r}_2(t), \dots, \mathbf{r}_N(t)]$ 处于模态 $\mathbf{p}_{\text{tot}} = [\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_N]$, 其中 $r_i(t) = \mathbf{p}_i =$

$[p_{i,1}, \dots, p_{i,m_i}] (i = 1, 2, \dots, m_i)$, 则 V 的弱无穷小生成元满足

$$\begin{aligned} \mathcal{L}V_{\mathbf{p}_{\text{tot}}} \leq & \sum_{i=1}^N \left(- \sum_{m=1}^{n_i} c_{i,m} z_{i,m}^2 + c_{\theta_i} \tilde{\theta}_i^T \hat{\theta}_i + c_{h_i} \tilde{h}_i \hat{h}_i + \right. \\ & l_{i,\mathbf{p}_i} c_{\beta_i} \times \tilde{\beta}_i \hat{\beta}_i + l_{i,\mathbf{p}_i} c_{g_i} \tilde{g}_i \hat{g}_i + \\ & \left. \sum_{m=1}^{n_i} \frac{n_i + 1 - m}{2} \Delta_{i,m}^2 - h_i \mu_{i,1} s_i z_{i,1} + \right. \\ & \left. 0.557 l_{i,\mathbf{p}_i} \varepsilon_{v_i} + \sum_{k=1}^{m_i} \sum_{q_{i,k}=1}^{N_S} \gamma_{\mathbf{p}_{i,k}, q_{i,k}} \times \right. \\ & \left. V_i^F(p_{i,1}, \dots, q_{i,k}, \dots, p_{i,m_i}) \right) \leq \\ & \sum_{i=1}^N \left(- \sum_{m=1}^{n_i} c_{i,m} z_{i,m}^2 - \frac{c_{\theta_i}}{2} |\tilde{\theta}_i|^2 - \frac{c_{h_i}}{2} \tilde{h}_i^2 - \right. \\ & \left. \frac{l_{i,\mathbf{p}_i} c_{\beta_i}}{2} \tilde{\beta}_i^2 - \frac{l_{i,\mathbf{p}_i} c_{g_i}}{2} \tilde{g}_i^2 + \right. \\ & \left. \sum_{m=1}^{n_i} \frac{n_i + 1 - m}{2} \Delta_{i,m}^2 - \right. \\ & \left. h_i \mu_{i,1} s_i z_{i,1} + \bar{D}_i + \sum_{k=1}^{m_i} \sum_{q_{i,k}=1}^{N_S} \gamma_{\mathbf{p}_{i,k}, q_{i,k}} \times \right. \\ & \left. V_i^F(p_{i,1}, \dots, q_{i,k}, \dots, p_{i,m_i}) \right), \quad (35) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{D}_i = & \sup_{t \geq 0, \mathbf{p}_i \in S^m} \left\{ 0.557 l_{i,\mathbf{p}_i} \varepsilon_{v_i} + \frac{c_{\theta_i}}{2} |\theta_i|^2 + \frac{c_{h_i}}{2} h_i^2 + \right. \\ & \left. \frac{l_{i,\mathbf{p}_i} c_{\beta_i}}{2} \beta_i^2 + \frac{l_{i,\mathbf{p}_i} c_{g_i}}{2} g_i^2 \right\}. \end{aligned}$$

接下来, 为补偿强度未知的子系统耦合, 设计辅助函数 s_i 为

$$s_i = \frac{z_{i,1}}{\mu_{i,1}} \tanh \frac{z_{i,1}}{\varepsilon_{s_i}} \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^{n_j} \varphi_{j,m,i}^2(y_i), \quad (36)$$

其中 ε_{s_i} 为正常数.

定义与子系统耦合强度相关的变量, 如下所示:

$$h_i = \max_{\substack{1 \leq j \leq N \\ 1 \leq m \leq n_j}} \frac{1}{2} (n_j + 1 - m) c_{j,m,i}. \quad (37)$$

根据假设 1 可知, 式 (35) 中与子系统耦合相关的项满足

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^{n_i} \frac{n_i + 1 - m}{2} \Delta_{i,m}^2 \leq & \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^{n_j} \sum_{i=1}^N \frac{n_j - m + 1}{2} c_{j,m,i} \varphi_{j,m,i}^2(y_i) \leq \\ & \sum_{i=1}^N h_i \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^{n_j} \varphi_{j,m,i}^2(y_i). \quad (38) \end{aligned}$$

考虑到式 (35) 中的 $\sum_{m=1}^{n_i} (n_i + 1 - m) \Delta_{i,m}^2 / 2 - h_i \mu_{i,1} s_i z_{i,1}$ 难免会给后续的稳定分析带来困难, 下面结合式 (36) 和 (38), 对其性质进行分类讨论.

1) 若 $z_{i,1} \leq \sqrt{1 + 0.2785 \varepsilon_{s_i}}$, 则由式 (14) 中 $z_{i,1}$ 的定义可知, 变量 $\chi_{i,1}$ 是有界的. 由式 (13) 可知, 第 i 个子系统的输出 y_i 是有界的, 因此, $\varphi_{j,m,i}^2(y_i)$ 是有界的. 此时, 存在常数 \check{D}_i 使得

$$\left| \sum_{m=1}^{n_i} \frac{n_i + 1 - m}{2} \Delta_{i,m}^2 - h_i \mu_{i,1} s_i z_{i,1} \right| \leq \check{D}_i. \quad (39)$$

2) 若 $z_{i,1} > \sqrt{1 + 0.2785 \varepsilon_{s_i}}$, 则根据引理 4, 可得到

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{n_i} \frac{n_i + 1 - m}{2} \Delta_{i,m}^2 - h_i \mu_{i,1} s_i z_{i,1} \leq & h_i (1 - z_{i,1}^2 + 0.2785 \varepsilon_{s_i}) \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^{n_j} \varphi_{j,m,i}^2(y_i) \leq 0. \quad (40) \end{aligned}$$

将式 (39) 和 (40) 代入 (35), 可得到

$$\begin{aligned} \mathcal{L}V_{\mathbf{p}_{\text{tot}}} \leq & - CV_{\mathbf{p}_{\text{tot}}} - \sum_{i=1}^N \sum_{\mathcal{I}=\beta_i, g_i} \frac{l_{i,\mathbf{p}_i} c_{\mathcal{I}}}{4} \tilde{\mathcal{I}}_{\mathbf{p}_i}^2 + D + \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{m_i} \sum_{q_{i,k}=1}^{N_S} \gamma_{\mathbf{p}_{i,k}, q_{i,k}} V_i^F(p_{i,1}, \dots, q_{i,k}, \dots, p_{i,m_i}). \quad (41) \end{aligned}$$

其中

$$C = \min_{1 \leq i \leq N} \{C_i\},$$

$$C_i =$$

$$\min_{1 \leq k \leq n_i} \left\{ 2c_{i,k}, \frac{c_{\theta_i}}{\lambda_{\max}(\Gamma_i^{-1})}, \gamma_{h_i} c_{h_i}, \frac{\gamma_{\beta_i} c_{\beta_i}}{2}, \frac{\gamma_{g_i} c_{g_i}}{2} \right\},$$

$$D = \sum_{i=1}^N D_i, \quad D_i = \bar{D}_i + \check{D}_i.$$

注 3 Markov 跳变执行器故障使得非线性大系统的每个子系统均显含多个 Markov 变量, 这使得式 (41) 中出现了与转移速率相关的非负项, 即该式的最后一项 (后续统一称之为“关联项”). 考虑到式 (25) 定义的 Lyapunov 候选函数 V_i 是模态 $\mathbf{p}_i = [p_{i,1}, \dots, p_{i,m_i}]$ 的函数, 而关联项则显含模态 $q_{i,k}$, 因此不能将其与 $-CV_{\mathbf{p}_{\text{tot}}}$ 合并. 如何消除关联项对系统稳定性带来的负面影响, 是稳定性分析中值得关注的一点.

3.2 稳定性分析

本文的主要结果可总结为定理 1.

定理 1 考虑由 Markov 跳变执行器故障下具

有输出约束且满足假设 1 ~ 假设 3 的不确定非线性互联大系统 (9)、分散控制器 (29) 以及参数更新律 (27)、(28)、(31) 和 (32) 构成的闭环系统. 若

$$\bar{c}_i := \min\{c_{\beta_i} \gamma_{\beta_i}, c_{g_i} \gamma_{g_i}\} \geq 2N_S \times \sum_{k=1}^{m_i} \max_{1 \leq p_{i,k}, q_{i,k} \leq N_S} \left\{ \frac{\gamma_{p_{i,k}, q_{i,k}} \pi_{p_{i,k}}}{\pi_{q_{i,k}}} \right\},$$

$$y_i(0) \in \Omega_i$$

对于 $i = 1, 2, \dots, N$ 成立, 则闭环系统中所有信号依概率有界, 子系统的输出跟踪误差 $e_i := y_i - y_{ri}$ 平均收敛于可调的残差集内, 且子系统输出 y_i 不违反约束 (10).

证明 令 $\Xi_i = [x_i^T, \hat{\theta}_i^T, \hat{h}_i, \hat{\beta}_i, \hat{g}_i]^T \in \mathbb{R}^{n_i+l_i+3}$ 为第 i 条控制回路的解. 定义 $t_{l_i} = \sigma_{l_i} \wedge t$, 其中 $\sigma_{l_i} := \inf\{t | t \geq 0, |\Xi_i(t)| \geq l_i\}$ 为首个逃逸时间. 显然, 任取 $t \in [0, \sigma_{l_i}]$, $|\Xi_i(t)| < l_i$ 几乎必然成立, 因此, V_i 在 $[0, \sigma_{l_i}]$ 上几乎必然有界. 再结合式 (41) 可知, $\mathcal{L}V_i$ 在 $[0, \sigma_{l_i}]$ 上几乎必然有界. 对 $\mathcal{L}V_i$ 取期望, 根据引理 2 和式 (41), 可得到

$$\begin{aligned} E\{\mathcal{L}V_i|_{t=t_{l_i}}\} &= \sum_{p_{i,1}=1}^{N_S} \dots \sum_{p_{i,m_i}=1}^{N_S} E\{\mathcal{L}V_{i,p_i}|_{t=t_{l_i}}\} \pi_{p_{i,1}} \dots \pi_{p_{i,m_i}} \leq \\ &- C_i E\{V_i|_{t=t_{l_i}}\} + D_i - \sum_{\mathcal{I}=\beta_i, g_i} \frac{C_{\mathcal{I}}}{4} E\{l_i \tilde{\mathcal{I}}^2|_{t=t_{l_i}}\} + \\ &\sum_{p_{i,1}=1}^{N_S} \dots \sum_{p_{i,m_i}=1}^{N_S} E\left\{ \sum_{k=1}^{m_i} \sum_{q_{i,k}=1}^{N_S} \gamma_{p_{i,k}, q_{i,k}} \times \right. \\ &\left. V_i^F(p_{i,1}, \dots, q_{i,k}, \dots, p_{i,m_i})|_{t=t_{l_i}} \pi_{p_{i,1}} \dots \pi_{p_{i,m_i}} \right\}. \end{aligned} \quad (42)$$

鉴于式 (42) 的最后一项中 V_i 显含模态 $q_{i,k}$, 因此不能将其与 $-C_i E\{V_i|_{t=t_{l_i}}\}$ 合并, 需要通过模态代换的方式进行处理. 通过固定 $k = \iota \in \{1, 2, \dots, m_i\}$, 可得到

$$\begin{aligned} \sum_{p_{i,1}=1}^{N_S} \dots \sum_{p_{i,m_i}=1}^{N_S} E\left\{ \sum_{q_{i,\iota}=1}^{N_S} \gamma_{p_{i,\iota}, q_{i,\iota}} \times \right. \\ \left. V_i^F(p_{i,1}, \dots, q_{i,\iota}, \dots, p_{i,m_i})|_{t=t_{l_i}} \pi_{p_{i,1}} \dots \pi_{p_{i,m_i}} \right\} \leq \\ \sum_{\mathcal{I}=\beta_i, g_i} \frac{N_S}{2\gamma_{\mathcal{I}}} \max_{1 \leq p_{i,\iota}, q_{i,\iota} \leq N_S} \left\{ \gamma_{p_{i,\iota}, q_{i,\iota}} \frac{\pi_{p_{i,\iota}}}{\pi_{q_{i,\iota}}} \right\} \times \\ E\{l_i \tilde{\mathcal{I}}^2|_{t=t_{l_i}}\}. \end{aligned} \quad (43)$$

这表明使得关系

$$E\{\mathcal{L}V_i|_{t=t_{l_i}}\} \leq -C_i E\{V_i|_{t=t_{l_i}}\} + D_i \quad (44)$$

成立的一个充分条件是

$$\begin{aligned} \bar{c}_i := \min\{c_{\beta_i} \gamma_{\beta_i}, c_{g_i} \gamma_{g_i}\} \geq 2N_S \times \sum_{k=1}^{m_i} \max_{1 \leq p_{i,k}, q_{i,k} \leq N_S} \left\{ \frac{\gamma_{p_{i,k}, q_{i,k}} \pi_{p_{i,k}}}{\pi_{q_{i,k}}} \right\}. \end{aligned} \quad (45)$$

该条件可通过调节设计参数 c_{β_i} 、 c_{g_i} 及其对应的自适应增益 γ_{β_i} 、 γ_{g_i} 来实现.

对式 (44) 应用 Dynkin 公式, 可得到

$$E\{V_i|_{t=t_{l_i}}\} \leq e^{-C_i t_{l_i}} V_i|_{t=0} + \frac{D_i}{C_i} (1 - e^{-C_i t_{l_i}}). \quad (46)$$

由逃逸时间的定义^[28] 易知 $P\{\lim_{l_i \rightarrow +\infty} \sigma_{l_i} = +\infty\} = 1$. 令 $l_i \rightarrow +\infty$, 可得到

$$\begin{aligned} E\{V_i\} \leq e^{-C_i t} V_i|_{t=0} + \frac{D_i}{C_i} (1 - e^{-C_i t}) \leq \\ V_i|_{t=0} + \frac{D_i}{C_i}. \end{aligned} \quad (47)$$

由式 (47), 结合 (34) 中 V 的定义以及式 (41) 中 C_i 和 D_i 的定义, 可得到

$$E\{V\} \leq V|_{t=0} + \frac{D}{C}. \quad (48)$$

根据引理 3, 由式 (48) 可推断出, 对于任意初始条件, 闭环系统的解 $\Xi = [\Xi_1^T, \Xi_2^T, \dots, \Xi_N^T]^T$ 依概率有界. 对于第 i 条控制回路, 根据坐标变换 (14)、所设计控制器和参数估计器的表达式以及假设 3 可以验证, 对于 $k = 1, 2, \dots, n_i$, $x_{i,k}$ 与 $z_{i,k}$ 的有界性等价, 即由 $x_{i,k}$ 、 $\hat{\theta}_i$ 、 \hat{h}_i 、 $\hat{\beta}_i$ 和 \hat{g}_i 的有界性可推出 $z_{i,k}$ 、 $\hat{\theta}_i$ 、 \hat{h}_i 、 $\hat{\beta}_i$ 和 \hat{g}_i 的有界性, 反之亦然. 由式 (21) 可知, $\alpha_{i,1}$ 依概率有界; 再结合 $x_{i,2}, \dots, x_{i,n_i}$ 的有界性可知, $\alpha_{i,2}, \dots, \alpha_{i,n_i}$ 依概率有界. 因此, $v_{i,j}$ 和 $u_{i,j}$ 依概率有界. 另外, 鉴于 y_i 和 y_{ri} 的有界性, 子系统跟踪误差 e_i 依概率有界. 基于以上分析可知, 闭环系统中的所有信号依概率有界.

另一方面, 注意到

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} E\left\{ \frac{1}{2} z_{i,1}^2 \right\} \leq \lim_{t \rightarrow +\infty} E\{V_i\} \leq \frac{D_i}{C_i}. \quad (49)$$

由引理 5, 可得到

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} E\{|z_{i,1}|\} \leq \sqrt{\frac{2D_i}{C_i}}. \quad (50)$$

由式 (14) 中 $z_{i,1}$ 的定义, 可得到

$$z_{i,1} = \log \left(\frac{(Y_i + y_i)(Y_i - y_{ri})}{(Y_i - y_i)(Y_i + y_{ri})} \right),$$

因此, 有

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} E\{|e_i|\} \leq \frac{(Y_i^2 - y_i y_{ri})(e^{\sqrt{2D_i/C_i}} - 1)}{Y_i(e^{\sqrt{2D_i/C_i}} + 1)}. \quad (51)$$

这表明子系统稳态跟踪误差能够平均收敛(也称作“1阶收敛”)于残差集

$$\Omega_{e_i} = \left\{ e_i \mid |e_i| \leq \frac{(Y_i^2 - y_i y_{ri})(e^{\sqrt{2D_i/C_i}} - 1)}{Y_i(e^{\sqrt{2D_i/C_i}} + 1)} \right\}, \quad (52)$$

且通过增大 $c_{i,k} (k = 1, 2, \dots, n_i)$ 、 γ_{h_i} 、 γ_{β_i} 、 γ_{g_i} 和 $1/\lambda_{\max}(\Gamma_i^{-1})$, 能够有效地减小跟踪误差.

最后, 由 $x_{i,1}$ (或 $\chi_{i,1}$) 的依概率有界性可知, 任取 $y_i(0) \in \Omega_i$, 子系统输出 y_i 始终满足约束条件, 即 $P\{-Y_i < y_i < Y_i\} = 1$. \square

注4 不同于文献 [18-20] 将 Lyapunov 函数中涉及的所有变量均视为 Markov 变量, 本文明确地指出了 V_i 中含 Markov 过程的变量 (即 l_i 、 $\tilde{\beta}_i$ 和 \tilde{g}_i), 所建立闭环系统随机稳定性的充分条件 (45) 仅依赖于设计参数 c_{β_i} 、 γ_{β_i} 、 c_{g_i} 和 γ_{g_i} , 从而降低了控制设计的保守性.

注5 从克服无穷多次执行器故障引发的参数估计趋于发散这一难题的角度分析, 所提出策略与文献 [16-17] 存在本质区别. 文献 [16-17] 克服无穷多次故障的关键是在参数估计器中引入了投影算子, 因此, 需要自适应参数处于一个已知的紧集内, 而本文则移除了这一限制条件. 式 (45) 表明, 只要 $c_{\beta_i} \gamma_{\beta_i}$ 和 $c_{g_i} \gamma_{g_i}$ 充分大, 所设计自适应容错控制器即可抑制由 Markov 跳变执行器故障产生的关联项 (即式 (42) 中的最后一项) 对系统稳定性带来的影响.

注6 与基于 BLF 的输出约束控制策略相比, 所设计基于输出变换的输出约束控制策略能够扩大子系统输出初值 $y_i(0)$ 的取值范围. 以一种典型的对数型 BLF 进行分析. 不妨假设第 i 个子系统的 BLF 为 $V_{\text{BLF},i} = (1/2) \log(k_{b,i}^2 / (k_{b,i}^2 - e_i^2))$. 其中: $k_{b,i} := (Y_i - \bar{Y}_i) > 0$, $\bar{Y}_i := \sup_{t \geq 0} |y_{ri}|$. 基于该 BLF 进行控制设计, 使得子系统输出 y_i 满足约束条件 $|y_i| < |y_{ri}| + k_{b,i} < Y_i$. 相应地, $y_i(0)$ 必须处于紧集

$$\Omega_{\text{BLF},i} = \{y_i(0) \mid -Y_i + \bar{Y}_i + y_{ri}(0) < y_i(0) < Y_i - \bar{Y}_i + y_{ri}(0)\}. \quad (53)$$

比较式 (53) 与 (10), 显然有 $\Omega_{\text{BLF},i} \subseteq \Omega_i$. 这表明所设计输出约束控制策略具有更强的可实现性.

4 仿真算例

考虑由弹簧连接的双倒立摆系统, 其中每个倒立摆由各自的两个伺服电机进行驱动. 系统的动力学模型^[21]为

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i,1} &= x_{i,2}, \quad \dot{x}_{i,2} = u_i + \theta_i^T \phi_{i,2}(\bar{x}_{i,2}) + \Delta_{i,2}(\mathbf{y}), \\ y_i &= x_{i,1}, \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (54)$$

其中

$$\begin{aligned} \theta_i &= \left[\frac{m_i g r}{J_i} - \frac{k r^2}{4 J_i}, \frac{k r}{2 J_i} (l - b) \right]^T, \\ \phi_{i,2}(\bar{x}_{i,2}) &= [\sin(x_{i,1}), 1]^T, \\ \Delta_{1,2}(\mathbf{y}) &= \frac{k r^2}{4 J_1} \sin(y_2), \\ \Delta_{2,2}(\mathbf{y}) &= \frac{k r^2}{4 J_2} \sin(y_1). \end{aligned}$$

这里: 状态变量 $x_{i,1} = \theta_i$ rad 和 $x_{i,2} = \dot{\theta}_i$ rad/s 分别为摆 i 的角位移和角速度; m_i 为摆 i 终端球体的质量; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度; r 为摆杆的长度; J_i 为摆 i 的转动惯量; u_i 为摆 i 的总体控制输入, 即两台伺服电机提供的输出转矩的和; k 为弹簧的弹性系数; l 为弹簧的自然长度; b 为摆的支点间的距离. 考虑伺服电机的随机故障, 可将实际的总体控制输入 u_i 表示为

$$\begin{aligned} u_i(\mathbf{r}_i(t), t) &= \\ &= \sum_{j=1}^2 u_{i,j}(r_{i,j}(t), t) = \\ &= \sum_{j=1}^2 (\rho_{i,j}(r_{i,j}(t), t) v_{i,j}(t) + \varrho_{i,j}(r_{i,j}(t), t)). \end{aligned} \quad (55)$$

其中 $\mathbf{r}_i(t) = [r_{i,1}(t), r_{i,2}(t)]$, $r_{i,1}(t)$ 和 $r_{i,2}(t)$ 为标量 Markov 过程, 二者相互独立, 且取值于有限集 $S = \{0, 1\}$. 假定根据充分多的历史数据, 观测到用于刻画驱动摆 1 的两台伺服电机 (记为电机 $(1,1)$ 和电机 $(1,2)$) 工作状态的 Markov 链 $r_{1,1}(t)$ 和 $r_{1,2}(t)$ 的生成元分别为 $\Gamma_{1,1} = \begin{bmatrix} -0.8 & 0.8 \\ 0.6 & -0.6 \end{bmatrix}$ 和 $\Gamma_{1,2} = \begin{bmatrix} -0.6 & 0.6 \\ 0.4 & -0.4 \end{bmatrix}$; 用于刻画驱动摆 2 的两台伺服电机 (记为电机 $(2,1)$ 和电机 $(2,2)$) 工作状态的 Markov 链 $r_{2,1}(t)$ 和 $r_{2,2}(t)$ 的生成元分别为 $\Gamma_{2,1} = \begin{bmatrix} -0.1 & 0.1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 和 $\Gamma_{2,2} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0.5 & -0.5 \end{bmatrix}$. 对于摆 1, 电机 $(1,1)$ 的工作状态在“正常”与“故障 $\rho_{1,1}(0, t) = 0.5 + 0.1 \sin(\pi t)$, $\varrho_{1,1}(0, t) = -1 - \cos(5t)$ ”间随机切换, 电机 $(1,2)$ 的工作状态在“正常”与“故障 $\rho_{1,2}(0, t) = 0$, $\varrho_{1,2}(0, t) = -2 \exp(-0.5(t - t_{1,2}^F))$ ”间随机切换, 其中 $t_{1,2}^F$ 为电机 $(1,2)$ 当前故障模式的发生时刻; 对于摆 2, 电机 $(2,1)$ 的工作状态在“正常”与“故障 $\rho_{2,1}(0, t) = 0.5 - 0.1 \sin(2\pi t)$, $\varrho_{2,1}(0, t) = 1$ ”间随机切换, 电机 $(2,2)$ 的工作状态在“正常”与“故障 $\rho_{2,2}(0, t) = 0$, $\varrho_{2,2}(0, t) = 5 \sin(t)$ ”间随机切换. 不难看出, 电机 $(1,2)$ 和电机 $(2,2)$ 发生故障时, 其效率因子为 0, 即输出完全不受所设计控制输入的影响.

在仿真中, 摆 1 和摆 2 角位移的参考信号分别

为 $y_{r1} = 5 \sin(t)$ 和 $y_{r2} = \sin(2t)$, 输出约束分别为 $Y_1 = 5.25$ 和 $Y_2 = 1.2$; 未知的被控对象参数为 $m_1 = 2.5 \text{ kg}$, $m_2 = 2 \text{ kg}$, $J_1 = 5 \text{ kg}$, $J_2 = 4 \text{ kg}$, $r = 0.5 \text{ m}$, $l = 0.5 \text{ m}$, $b = 0.4 \text{ m}$, $k = 100 \text{ N/m}$; 除 $x_{1,1}(0) = 1.5$ 和 $x_{2,1}(0) = 0.5$, 其他状态 (包括被控对象状态和参数估计) 的初值均被置为 0; 设计参数为 $c_{i,1} = 0.025$, $c_{i,2} = 0.05$, $c_{\{\theta_i, h_i\}} = 0.25$, $c_{\{\beta_i, g_i\}} = 1$, $\Gamma_i = I_2$, $\gamma_{h_i} = 1$, $\gamma_{\{\beta_i, g_i\}} = 100$, $\varepsilon_{\{s_i, v_i\}} = 0.001$.

双倒立摆系统的仿真结果如图 1 和图 2 所示. 其中: 图 1 为摆 1 和摆 2 角位移的轨迹, 点划线为输出约束; 图 2 为执行器的输出.

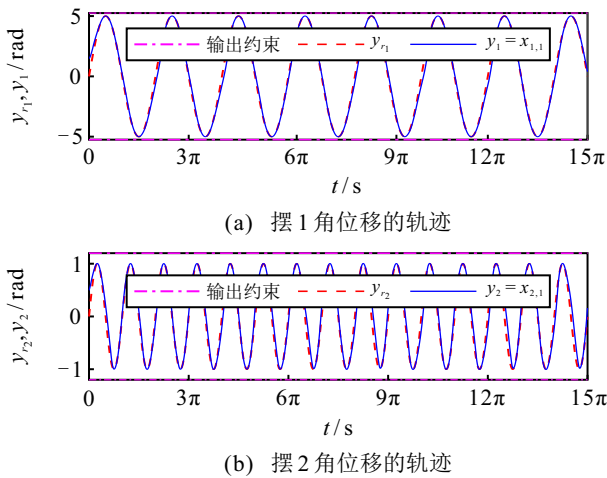


图1 摆 1 和摆 2 角位移的轨迹

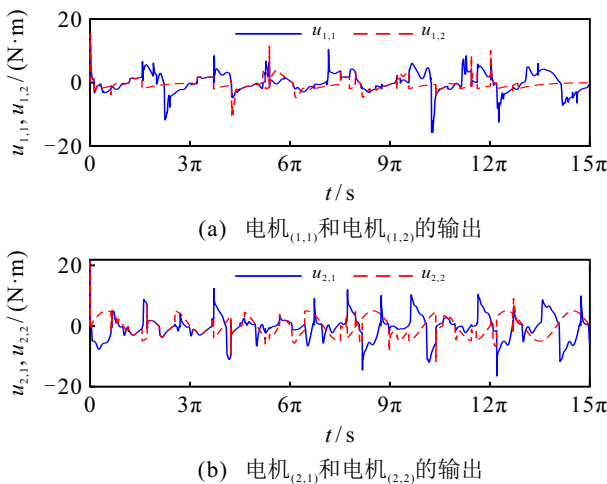


图2 执行器的输出

仿真结果表明, 即便是执行器发生断续故障的情况下, 所设计分散自适应容错控制方案仍然能够保证闭环大系统中信号的有界性, 子系统输出的跟踪误差能够收敛至原点附近的一个小邻域内, 且子系统输出始终不违反约束. 综上分析, 仿真结果与理论分析一致.

5 结论

本文解决了 Markov 跳变执行器故障下, 具有输

出约束的不确定互联大系统分散自适应容错跟踪控制的问题. 为补偿强度未知的子系统耦合, 本文构造了一个双曲正切型辅助函数, 并设计了对应的参数估计器. 为补偿 Markov 跳变执行器故障, 本文定义了 3 个表征故障参数边界的随机变量, 通过对故障参数边界的估计设计了自适应容错控制器. 为进一步提高控制系统的安全性和可靠性, 采用输出变换策略, 将子系统的输出约束问题直接转化为变换后变量的依概率有界性问题, 保证了子系统输出始终满足约束条件. 所提出方案能够保证闭环系统中所有信号的依概率有界性和子系统输出跟踪误差的平均收敛性. 更深入的研究是考虑随机扰动的影响^[29], 并同时补偿执行器饱和^[13]等非线性特性.

参考文献 (References)

- [1] Ioannou P, Kokotovic P. Decentralized adaptive control of interconnected systems with reduced-order models[J]. *Automatica*, 1985, 21(4): 401-412.
- [2] Hill D J, Wen C Y, Goodwin G C. Stability analysis of decentralised robust adaptive control[J]. *Systems & Control Letters*, 1988, 11(4): 277-284.
- [3] Wen C Y. Decentralized adaptive regulation[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(10): 2163-2166.
- [4] Zhou J, Wen C Y. Decentralized backstepping adaptive output tracking of interconnected nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(10): 2378-2384.
- [5] Li X J, Ren X X, Yang G H. Backstepping-based decentralized tracking control for a class of interconnected stochastic nonlinear systems coupled via a directed graph[J]. *Information Sciences*, 2019, 477: 302-320.
- [6] Tong S C, Li Y M, Liu Y J. Observer-based adaptive neural networks control for large-scale interconnected systems with nonconstant control gains[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, 32(4): 1575-1585.
- [7] Niu B, Liu J D, Wang D, et al. Adaptive decentralized asymptotic tracking control for large-scale nonlinear systems with unknown strong interconnections[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, 9(1): 173-186.
- [8] Sun L B, Huang X C, Song Y D. Decentralized intermittent feedback adaptive control of non-triangular nonlinear time-varying systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2024, 69(2): 1265-1272.
- [9] 温长云, 周靖, 王薇, 等. 一种统一的鲁棒自适应控制方法及近期自适应控制结果综述[J]. *控制与决策*, 2018, 33(5): 782-808.
(Wen C Y, Zhou J, Wang W, et al. A unified conventional approach for robust adaptive control systems and some reviews on recent developments in adaptive control[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(5): 782-808.)

- [10] Tao G, Joshi S M, Ma X. Adaptive state feedback and tracking control of systems with actuator failures[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46(1): 78-95.
- [11] Tang X D, Tao G, Joshi S M. Adaptive actuator failure compensation for parametric strict feedback systems and an aircraft application[J]. *Automatica*, 2003, 39(11): 1975-1982.
- [12] Wang H Q, Chai G, Kang S J. Adaptive fixed-time anti-synchronization and synchronization control for Liu-Chen-Liu chaotic systems with actuator faults[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2024, 38(6): 2158-2177.
- [13] 胡银龙, 彭佳薇. 考虑输入和输出约束的主动悬架系统自适应容错控制[J]. *控制与决策*, 2025, 40(2): 693-698.
(Hu Y L, Peng J W. Adaptive fault-tolerant control of active suspension systems with input and output constraints[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(2): 693-698.)
- [14] Wang P, Yu C P, Sun J. Decentralized adaptive tracking control for nonlinear large-scale systems with unknown control directions[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2022, 32(2): 620-648.
- [15] Xu L X, Wang Y L, Wang X F, et al. Decentralized event-triggered adaptive control for interconnected nonlinear systems with actuator failures[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2023, 31(1): 148-159.
- [16] Wang W, Wen C Y. Adaptive compensation for infinite number of actuator failures or faults[J]. *Automatica*, 2011, 47(10): 2197-2210.
- [17] Lai G Y, Wen C Y, Liu Z, et al. Adaptive compensation for infinite number of actuator failures based on tuning function approach[J]. *Automatica*, 2018, 87: 365-374.
- [18] Fan H J, Liu B, Shen Y D, et al. Adaptive failure compensation control for uncertain systems with stochastic actuator failures[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(3): 808-814.
- [19] Liu B, Saif M, Fan H J. Adaptive fault tolerant control of a half-car active suspension systems subject to random actuator failures[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(6): 2847-2857.
- [20] Liu B, Liu L, Wang Y J, et al. Stabilization of nonlinear uncertain systems with stochastic actuator failures and time-varying delay[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2016, 26(9): 1825-1840.
- [21] Li X J, Yang G H. Neural-network-based adaptive decentralized fault-tolerant control for a class of interconnected nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2018, 29(1): 144-155.
- [22] Shao X F, Ye D. Event-based adaptive fuzzy fixed-time control for nonlinear interconnected systems with non-affine nonlinear faults[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2022, 432: 1-27.
- [23] Hou Y X, Liu Y J, Tong S C. Decentralized event-triggered fault-tolerant control for switched interconnected nonlinear systems with input saturation and time-varying full-state constraints[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2024, 32(6): 3850-3860.
- [24] Jin X. Adaptive decentralized finite-time output tracking control for MIMO interconnected nonlinear systems with output constraints and actuator faults[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2018, 28(5): 1808-1829.
- [25] 赵光同, 曹亮, 周琪, 等. 具有未建模动态的互联大系统事件触发自适应模糊控制[J]. *自动化学报*, 2021, 47(8): 1932-1942.
(Zhao G T, Cao L, Zhou Q, et al. Event-triggered adaptive fuzzy control for interconnected large-scale systems with unmodeled dynamics[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(8): 1932-1942.)
- [26] Zhao K, Song Y D. Removing the feasibility conditions imposed on tracking control designs for state-constrained strict-feedback systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(3): 1265-1272.
- [27] Hua Y, Zhang T P. Adaptive neural event-triggered control of MIMO pure-feedback systems with asymmetric output constraints and unmodeled dynamics[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 37684-37696.
- [28] Mao X Y, Yuan C G. Stochastic differential equations with Markovian switching[M]. London: Imperial College Press, 2006.
- [29] 朱新峰, 丁文武, 张天平. 具有输入量化和全状态约束的非严格反馈随机非线性系统的有限时间动态面控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(10): 2575-2584.
(Zhu X F, Ding W W, Zhang T P. Finite-time dynamic surface control for nonstrict-feedback stochastic nonlinear systems with input quantization and full-state constraints[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(10): 2575-2584.)

作者简介

张骄阳 (1998-), 男, 博士生, 主要研究方向为非线性与自适应控制、容错控制、量子信息与控制, E-mail: jy Zhang_lemon@sina.com;

樊慧津 (1976-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为不确定系统的分析与控制、飞行控制系统、协同与编队控制, E-mail: ehjfan@hust.edu.cn;

方新鹏 (1996-), 男, 博士, 主要研究方向为不确定系统的自适应控制、容错控制、事件触发控制、飞行控制系统, E-mail: xpfang1996@gmail.com;

刘磊 (1981-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为飞行器控制、制导和轨迹优化、协同控制与决策, E-mail: liulei@hust.edu.cn;

王博 (1985-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为智能方法驱动的最优控制与决策问题求解, E-mail: wb8517@hust.edu.cn;

王薇 (1983-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为信息物理融合系统安全控制、群智系统分布式协同控制、飞行控制系统容错控制、自适应控制理论与应用, E-mail: w.wang@buaa.edu.cn.