

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.10.009

带有执行器失效的确定时间事件触发机制

Event-triggered mechanism with settling time for actuator failures

黄堃锋,洪嘉纯,吴宇深,朱厚耀*

HUANG Kunfeng, HONG Jiachun, WU Yushen, ZHU Houyao*

(广州大学 机械与电气工程学院, 广州 510006)

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

摘要:在工业系统的实际操作过程中可能会发生未知形式的执行器故障,导致控制系统不稳定甚至崩溃。针对具有执行器故障的不确定非线性系统,提出了一种有关事件触发的规定建立时间共识自适应补偿控制方法。设计了一种有限时间神经网络自适应控制器,引入非线性变换函数以确保跟踪误差在规定的建立时间内收敛到预定义的时间间隔内。提出了一种利用反步技术建立的事件触发式设定时间稳定补偿控制策略,在该策略下系统不仅可以在发生故障时实现快速补偿,而且可以预设有限的收敛时间。仿真试验表明,该策略能够有效节省网络带宽,保证系统的全局一致有界收敛。

关键词:控制系统;执行器失效;神经网络系统;规定的稳定时间;事件触发控制

中图分类号:TP 273

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2021)10-0073-07

Abstract: Unknown forms of actuator failures during the operation of industrial systems might lead to the instability or even crash of the control systems. For a class of uncertain nonlinear systems with actuator failures, an event-triggered adaptive compensation control with prescribed settling time consensus is proposed. A finite time neural network adaptive controller which introduces a nonlinear transformation function is designed, so as to ensure the tracking error converges to the predefined interval within a prescribed settling time. Meanwhile, based on the backstepping technology, an event-triggered compensation control strategy with prescribed settling time consensus is proposed. Under this strategy, the system can achieve rapid compensation for the event of failure and preset the finite convergence time. Finally, the simulation experiments validate that the proposed strategy is able to effectively save network bandwidth and ensure the global uniform bounded convergence of the system.

Keywords: control system; actuator failure; neural network system; prescribed settling time; event-triggered control

0 引言

随着互联网和通信技术的高速发展,网络控制系统(NCS)在实践中得到广泛应用,如智能建筑^[1]、工业控制^[2]、卫星通信^[3]、交通网络^[4]、无人机^[5]等。

在实际的NCS中,执行器和控制器之间的传输是通过对共享通信系统进行采样来实现的。但通信信道的带宽有限且不能在短时间内增加,而传统的时间触发系统状态采样和控制器更新是定期执

行的,这将导致传统时间触发控制系统中通信资源的浪费^[6]。在事件触发策略中,当系统状态满足预期事件条件时才会执行采样^[7]。因此,为了节省网络带宽并最大限度利用通信资源,在控制系统中使用事件触发式采样代替时间触发式采样^[8]。文献[9]提出了一种基于事件的线性系统在随机扰动下的控制策略;此外,由于实际操作中存在未知的干扰,对基于事件触发的不确定非线性系统进行了研究。文献[10]将一种新的分散事件触发控制方案应用于具有耦合时滞的复杂动力学网络,并设计了一种改进的事件触发控制器。

另外,控制的有效性取决于主动控制系统中制动力器的操作是否正常,但在工业系统的实际操作过程中,执行器可能会以未知的形式发生故障,如果没有及时采取适当的补救措施,轻微故障会降低控制性能,严重时可能导致控制系统崩溃^[11]。因

收稿日期:2021-06-02;修回日期:2021-07-26

基金项目:广东省教育厅人才项目(2018KQNCX197);广东省自然科学基金项目(2019A1515110995);广州市科技计划项目(202002030286);广州大学校内项目(YG2020009);广州大学省级大学生创新训练项目(S202111078041);2021年广东省科技创新战略专项资金(“攀登计划”专项资金)资助立项项目(pdjh2021b0396)

此,针对具有执行器故障的非线性系统,相关学者提出了许多基于非线性控制理论的故障补偿控制方法。文献[12]针对多输入多输出(MIMO)非线性系统不确定参数存在未知的时滞有界时变自适应控制问题,提出了一种新的反馈容错方案;文献[13]将自适应模糊输出反馈控制应用于随机非线性系统。上述控制方法有效解决了部分执行器故障问题,但执行器故障会影响控制精度,为避免较大的实际损失,如何快速补偿执行器故障值得关注。

在实践中,神经网络系统和模糊逻辑理论被用于处理自适应智能逼近跟踪控制问题^[14]。文献[15]提出了神经网络的标准类别并研究了这些神经网络的全局渐近稳定性,有效解决了复杂非线性系统的跟踪控制问题。

上面提到的大多数控制方法都将李雅普诺夫稳定性归于渐近稳定性领域,在这种情况下,时间趋于无穷大时系统状态会收敛到平衡点。但是,随着控制系统越来越复杂、要求越来越高,需要无限时间的渐近收敛不能满足系统运行的需要,因此,提出了各种有限时间控制策略来解决非线性不确定系统的有限时间跟踪控制问题^[16]。文献[17]考虑到给定的暂态性能指标,提出了一种自适应的有限时间控制方法来稳定非线性不确定系统。考虑到未知的扰动和执行器故障,文献[18]提出了一种新的自适应有限时间控制方法来分析随机非线性系统的稳定性。上述文献从定理的角度证明了它们可以达到有限时间的稳定性。为了克服实际情况中的未知干扰,文献[19]引入了自适应神经网络的非奇异滑动模式,确保闭环系统的有限时间收敛。

以上有限时间控制方法可确保系统状态在有限时间内收敛,但这些有限时间控制方法的收敛时间受未知的干扰影响,不能预先指定或设计。这意味着具体的稳定时间是未知的,所谓的有限时间只是估计的稳定时间的上限,而不是实际的收敛时间。因此,如何设计出具有预设收敛时间的有限时间控制器值得关注。在文献[20]中,常规的有限时间控制建立在一个新颖的缩放函数上,从而产生了可预测的收敛时间。但当执行器出现故障时,在规定的稳定时间控制框架内快速补偿故障并预设收敛时间仍是一个挑战。

基于上述讨论和反步设计法,针对具有不确定执行器故障的非线性系统,本文提出了一种事件触发的规定建立时间共识自适应补偿控制方法,主要内容如下。

(1)基于反步技术,提出一种不确定非线性系

统的事件触发式有限时间自适应控制策略,该策略可以快速弥补故障并有效节省网络带宽。

(2)利用故障补偿策略,提出一种自适应神经网络控制方法来处理系统中未知的非线性项,可以保证系统状态的稳定性以及有限时间内的全局有界收敛。

(3)引入非线性变换函数,以确保跟踪误差在规定的建立时间内收敛到预定义的时间间隔内,并且变换后的系统依旧是稳定的,确保实际跟踪误差的有限时间收敛和规定的建立时间可以被调整;同时,可以统一预设有限收敛时间。

1 问题描述

1.1 模型和定义

考虑以下几类不确定的非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + f_1(\bar{x}_1) \\ \vdots \\ \dot{x}_n = \sum_{j=1}^m k_j \tau_j(x) u_j(t) + f_n(\bar{x}_n) \\ y = x_1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $x_i \in \mathbf{R} (i = 1, 2, \dots, n)$ 为系统状态; $u_j(t) \in \mathbf{R} (j = 1, 2, \dots, m)$ 为系统输入; $y \in \mathbf{R}$ 为系统输出; $\tau_j(x) \in \mathbf{R}$ 为系统中已知的光滑非线性函数; $f_i(\cdot) \in \mathbf{R}$ 为系统中不确定的非线性函数; $\bar{x}_i = [x_1, x_2, \dots, x_i]^T \in \mathbf{R}^i$; $k_j \in \mathbf{R}$ 为已知方向、未知大小的参数。

然后,考虑第 j 个执行器可能在运行期间失效,因此,在 t_r 时刻的瞬时故障模型可以表示为

$$\begin{cases} u_j(t) = \sigma_j u_{vj}(t) + u_{vj} & \forall t \geq t_r \\ \sigma_j u_{vj} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $u_{vj}(t)$ 为系统的输入; $0 \leq \sigma_j < 1$, t_r 和 u_{vj} 均为不确定的常数。

本文考虑以下 2 种程度的执行器失效:一是执行器部分失效,这就意味着执行器输出 $u_j(t)$ 在运行时失去了一些性能,因此就有 $u_j(t) = \sigma_j u_{vj}(t)$ 和 $0 < \sigma_j < 1$;另一个是执行器完全失效,这就意味着执行器输出 $u_j(t)$ 不再受 $u_{vj}(t)$ 的影响,但受 u_{vj} 的影响,所以就有 $u_j(t) = u_{vj}$ 和 $\sigma_j = 0$ 。

因此,可实现以下带有执行器失效的系统模型

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + f_1(\bar{x}_1) \\ \vdots \\ \dot{x}_n = \sum_{j=1}^m k_j \tau_j(x) (\sigma_j u_{vj}(t) + u_{vj}) + f_n(\bar{x}_n) \\ y = x_1 \end{cases}. \quad (3)$$

1.2 事件触发控制设计

由于通信网络的网络资源有限,为了节省包括通信信道带宽和计算能力在内的网络资源,可以考虑采用以下事件触发方案

$$\begin{cases} u_{vj}(t) = \omega_j(t_p) \quad \forall t \in [t_p, t_{p+1}) \\ t_{p+1} = \inf \{t \in \mathbf{R} | e(t) \geq F(u_{vj}(t))\} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $t_p (p \in \mathbf{R}^+)$ 为控制器的更新时间; $\omega_j(t)$ 为要设计的触发机制的函数; $e(t) = \omega_j(t) - u_{vj}(t)$ 为测量误差; $F(u_{vj}(t))$ 为待设函数。

1.3 转换函数概述

为了达到实际规定的建立时间跟踪性能,可以引入以下转换函数

$$c(t) = \begin{cases} \frac{1}{(1-s)(T-t)^2 s T^2 e^{\zeta t}} & 0 \leq t < T \\ \frac{1}{s} & t \geq T \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $0 < s \ll 1$ 和 ζ 为可设常数; $0 < T < \infty$ 为实际规定的稳定时间。

根据 $c(t)$ 的定义,有关转换的几个属性如下。

(1) $c(t)$ 随着时间 $t \in [0, T)$ 的推移严格增长,当 $t \geq T$ 时, $c(t) = \frac{1}{s}$ 成立,这就意味着 $c(t) \in \left[1, \frac{1}{s}\right]$ 属于 $t \in [0, \infty)$ 。

(2) 为了确保变量在转换前后具有相同的初始值,它满足 $c(0) = 1$ 。

(3) $c(t)$ 是有界且可微的,同时 $\dot{c}(t)$ 是有界的,这就意味着 $|\dot{c}(t)| \leq c_{\max}$, 其中, $c_{\max} > 0$ 且 $c_{\max}$ 为常数。

(4) 在自适应控制方案的设计中,使用神经网络近似未知的非线性函数。明确 $\phi(x) = [\phi_1(x), \phi_2(x), \dots, \phi_n(x)]^T$ 为已知的基函数向量, $\eta = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n]^T$ 为权重向量。

1.4 近似函数的研究

在自适应控制方法的设计中,径向基函数神经网络(RBFNNs)用于近似未知的非线性函数,因此,对于未知的连续非线性函数 $f(Y)$,可以在紧凑集上近似

$$f(Y) = \eta^T \phi(Y) + \rho, \quad (6)$$

式中: $\phi(Y) = [\phi_1(Y), \phi_2(Y), \dots, \phi_D(Y)]^T$ 为已知的基函数向量; D 为神经元的数量; $\eta = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_D]^T \in \mathbf{R}^D$ 为最佳权重向量; $\rho > 0$ 为近似误差。

然后,高斯函数 $\phi_i(Y)$ 满足

$$\phi_i(Y) = \exp \left(\frac{-(Y - v_i)^T (Y - v_i)}{s_i^2} \right), \quad i = 1, 2, \dots, D, \quad (7)$$

式中: D 为神经网络(NN)节点的编号, $D > 1$; $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iM}]^T$ 为高斯函数的中心; s_i 为高斯函数的宽度。

为了促进自适应控制器的设计和得到合适的自适应控制器,提出了以下假设。

假设 1^[21]: 在时间间隔 $[T_q, T_{q+1}) (q = 0, 1, \dots, F)$ 中设定 M 代表执行器全部失效,设定 M_{vj} 代表其他没有全部失效的执行器,明确 $M_{vj} \cup M = \{1, 2, \dots, m\}$; F 为自然数。

假设 2^[21]: 全部失效执行器的最大数量为 $m - 1$, 但部分失效执行器的数量最多可达 m , 剩余的驱动力便可以达到控制目的; 同时,任何执行器都不能多次切换状态。

设定 $T_0 = 0$, 假设在时间间隔 $[T_q, T_{q+1}) (q = 0, 1, \dots, F)$ 中共有 $m_j (0 \leq m_j \leq m)$ 个执行器失效且没有出现新的执行器失效。显然,在时间间隔 $[T_0, T_1)$ 中所有执行器都可以正常工作,新的执行器失效会出现在 T_1 时刻之后。从假设 2 中可得, T_f 是有限的, T_{F+1} 是无限的。

假设 3: r 是有界且已知的期望信号; 此外, r 具有 $(n + 1)$ 阶导数。

2 控制器设计

2.1 系统模型分析

为了补偿执行器失效,设计了基于相对阈值策略的事件触发的自适应补偿控制器。值得一提的是,自适应补偿控制方法采用反步技术来跟踪测量中的未知参数,其中设计 n 个递归步骤,具体计划如下。

引入以下虚拟误差方程式

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - r \\ z_2 = x_2 - \alpha_1 - r^{(1)} \\ \vdots \\ z_n = x_n - \alpha_{n-1} - r^{(n-1)} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $\alpha_{i-1} (i = 2, 3, \dots, n)$ 为虚拟控制律; $z_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为可变误差。

为了实现自适应和在规定的稳定时间内的实际跟踪,引入非线性转换函数 $c(t)$ 来改变实际跟踪误差和虚拟误差,转化后的实际跟踪误差 e 和虚拟误差 z_i 可以定义为

$$\begin{cases} e = x_1 - r \\ z_1 = c(t)e \\ z_2 = x_2 - \alpha_1 - r^{(1)} \\ \vdots \\ z_n = x_n - \alpha_{n-1} - r^{(n-1)} \end{cases} \quad (9)$$

选择虚拟控制器 α_1 为

$$\alpha_1 = -b_1 e - e \hat{\varphi}_1 \Gamma_1, \quad (10)$$

式中: b_1 为正常数; $\hat{\varphi}_1$ 为 φ_1 的估计值, $\varphi_1 =$

$$\max\left\{\|\eta_1\|^2, 1\right\}; \tilde{\varphi} = \varphi - \hat{\varphi}; \Gamma_1 = \frac{e^2}{2} + c^2(t) \left(1 + \frac{\|\phi_1\|^2}{2a_1^2}\right),$$

a_1 为待设定的常数。

选择自适应律 $\dot{\hat{\varphi}}_1$ 为

$$\dot{\hat{\varphi}}_1 = \lambda_1 z_1^2 \Gamma_1 - \theta_1 \hat{\varphi}_1, \quad (11)$$

式中: λ_1 为 $r \times r$ 的正定矩阵; θ_1 为正设计参数。

因此可定义虚拟控制器 α_i 和自适应律 $\dot{\hat{\varphi}}_i$ 为

$$\alpha_i = -b_i z_i - \frac{z_i}{2} - z_i \hat{\varphi}_i \Gamma_i, \quad (12)$$

$$\dot{\hat{\varphi}}_i = \lambda_i z_i^2 \Gamma_i - \theta_i \hat{\varphi}_i, \quad (13)$$

式中: b_i 为正常数; $\hat{\varphi}_i$ 为 φ_i 的估计值; λ_i 为 $r \times r$ 的正

定矩阵; θ_i 为正设计参数; $\Gamma_i = 1 + \frac{\|\phi_i\|^2}{2a_i^2}$, a_i 为待设定的常数。

2.2 自适应事件触发控制设计

在系统执行器部分失效的情况下,可以通过更大的阈值获得更长的更新间隔。当系统状态趋于稳定时,可以通过较小的阈值获得较短的更新间隔,然后通过一个更精确的控制信号 $u_{vj}(t)$ 获得更好的系统性能。因此,可以设计用于补偿由触发机制引起的测量误差的控制器,建立以下事件触发策略。

$$\begin{cases} \omega_j(t) = -(1+\mu) \left(\bar{u}_j \tanh\left(\frac{z_n \operatorname{sgn}(k_j) \tau_j(x) \bar{u}_j}{\varepsilon}\right) + \right. \\ \quad \left. \bar{n} \tanh\left(\frac{z_n \operatorname{sgn}(k_j) \tau_j(x) \bar{n}}{\xi}\right) \right) \\ u_{vj}(t) = \omega_j(t_k), \forall t \in [t_k, t_{k+1}) \\ t_{k+1} = \inf\left\{t \in \mathbf{R} \mid |\bar{e}_j(t)| \geq \mu |u_{vj}(t)| + n_1\right\}, \mu > 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\bar{e}_j(t) = \omega_j(t) - u_{vj}(t)$ 为测量误差; $t_k > 0$,

$k \in \mathbf{R}^+, \xi \in \mathbf{R}^+, 1 > \mu > 0, n_1 > 0, \bar{n} > \frac{n_1}{1-\mu} > 0$ 均为可设常数。

在时间间隔 $[t_k, t_{k+1})$ 中, $\omega_j(t) = (1 +$

$\varepsilon_1(t)\mu)u_{vj}(t) + \varepsilon_2(t)n_1$, $\varepsilon_1(t)$ 和 $\varepsilon_2(t)$ 都是随时间变化的常数,满足 $|\varepsilon_1(t)| \leq 1$ 和 $|\varepsilon_2(t)| \leq 1$ 。通过转换可以得出 $u_{vj}(t) = \frac{\omega(t) - \varepsilon_2(t)n_1}{1 + \varepsilon_1(t)\mu}$ 。

鉴于参数的不可知性,未知参数向量 ψ_j 的估计值 $\hat{\psi}$ 用于控制律 $\bar{u}_j$ 的设计。因此,应按以下方式更改控制器

$$\bar{u}_j = \operatorname{sgn}(k_j) \hat{\Phi}_j^T B \frac{1}{\tau_j(x)}, \quad (15)$$

式中: $\hat{\Phi}$ 为未知参数向量 Φ_j 的估计值; $\tilde{\Phi}_j = \Phi_j - \hat{\Phi}_j$;

$$\Phi_j = [\Phi_{j,1}, \Phi_{j,2}, \dots, \Phi_{j,2m}]^T; B = [\alpha_n, \tau_1, \dots, \tau_m]^T。$$

设定参数更新律 $\dot{\Phi}$ 为

$$\dot{\hat{\Phi}} = -z_n \lambda_j B - \gamma_j \hat{\Phi}, \quad (16)$$

式中: γ_j 为正定矩阵。

2.3 稳定性分析

考虑带有执行器失效的系统(3),虚拟控制器(10), (12), 自适应律(11), (13), 参数更新律(16)以及事件触发的规定的稳定时间共识控制器(14),可以保证以下结果^[22]。

(1)所考虑系统的所有信号都是有界的。

(2)存在一段时间 $t^* > 0$, 这样,执行间隔 $t^* \leq \{t_{k+1} - t_k\}$ 都小于有界 $t^*, \forall k \in \mathbf{Z}^+$, 因此可以避免芝诺行为。

首先,选择李雅普诺夫函数 V_n 为

$$V_n = V_{n-1} + \frac{1}{2} z_n^2 + \frac{1}{2} \tilde{\varphi}_n^T \lambda_n^{-1} \tilde{\varphi}_n + \sum_{j \in M_{vj}} \frac{|k_j| \sigma_j}{2} \tilde{\Phi}_j^T \lambda_j^{-1} \tilde{\Phi}_j. \quad (17)$$

通过推导分析得

$$|e| \leq \begin{cases} (1-s) \left(\frac{T-t}{T}\right)^2 e^{-\zeta t} H + gH & 0 \leq t < T \\ sH & t \geq T \end{cases} \quad (18)$$

结合上述结论,根据事件触发策略,通过推理分析可得出以下结论:在所考虑系统中所有信号都是有界的,可以有效避免芝诺行为;在规定的时间内,实际的跟踪误差收敛到紧凑集 $\Xi_j = \{e_j \mid |e_j| \leq sH\}$ 中,然后其衰减率 $v \geq \left(\frac{T-t}{T}\right)^2 e^{-\zeta t}$, 表示达到了实际规定的建立时间跟踪性能。

通过分析规定的建立时间 T 可知,通过调整 T, ζ 和 s , 可以影响系统的跟踪误差和收敛速度。

3 仿真分析

通过实例仿真验证所提出的方案是否适用于带有执行器故障补偿的不确定非线性系统。

考虑一种单连杆机械臂模型

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \sum_{j=1}^2 \frac{k_j \tau_j(x)}{I} (\sigma_j u_{vj}(t) + u_{vj}) - \\ \quad \frac{\mu_D}{I} x_2 - \frac{mgl}{I} \cos x_1 + \frac{d_k}{I} \end{cases}, \quad (19)$$

式中: x_1, x_2 分别为位移和速度; I 为惯性; m 为质量; g 为重力加速度; l 为质心到关节的长度; μ_D 为黏性摩擦系数; 设置障碍为 $d_k = \sin t$ 。

系统参数如下: 已知和未知函数分别为 $f_1(\bar{x}_1) = x_1(1 - \sin^2 x_1) + 0.1 \cos x_1$ 和 $f_2(\bar{x}_2) = -3.5x_2 + x_1x_2^2 + 0.1 \sin(2x_1x_2)$; $k_j = 1$; 函数 $\tau_j(x) = 2.4 + 0.1 \sin x_1$ ($j = 1, 2$); 参考输出信号为 $r = \sin t$ 。

为了确保系统内的所有信号都是有界的, 设计了以下参数: $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$, $\theta_1 = \theta_2 = 1$, $\gamma_j = 1$, $a_1 = a_2 = 1$, $b_1 = 34$, $b_2 = 15$, $B = [0 \ 0]^T$, $\rho = 40$, $\mu = 0.2$, $\zeta = 1$, $n_1 = 1.35$, $s = 0.3$, $T = 0.4$, $\xi = 40$, $q = 1$, $m = 1$, $g = 9.8$, $l = 0.4$, $\mu_D = 1$, $I = \frac{4}{3} ml^2$ 。

假设单连杆机械臂的执行器 1 在 5 s 后发生部分失效, 10 s 后完全失效, 执行器 2 运行正常, 其参数设置为: $\sigma = 0.5$ (输入、输出比为 50%)。系统输出和参考信号如图 1 所示, 不具有上述控制方法的控制输入如图 2 所示, 具有事件触发的控制输入如图 3 所示, 系统的跟踪误差如图 4 所示, 事件触发量及其间隔如图 5 所示。

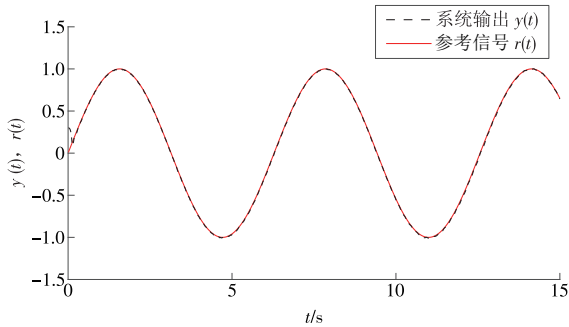


图 1 系统输出和参考信号

Fig. 1 System output and reference output

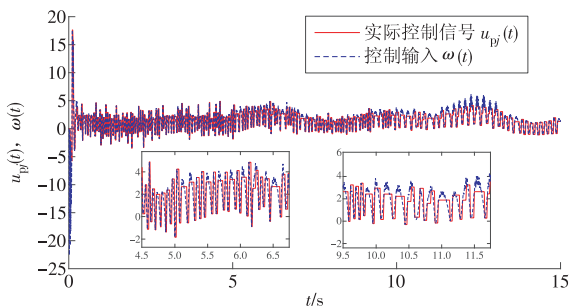


图 2 不具有控制方法的控制输入

Fig. 2 Control inputs with no control methods

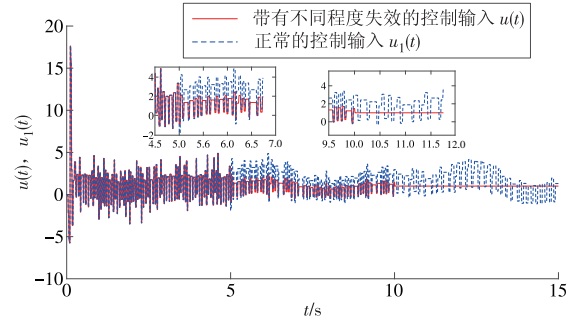


图 3 具有事件触发的控制输入

Fig. 3 Event-triggered control inputs

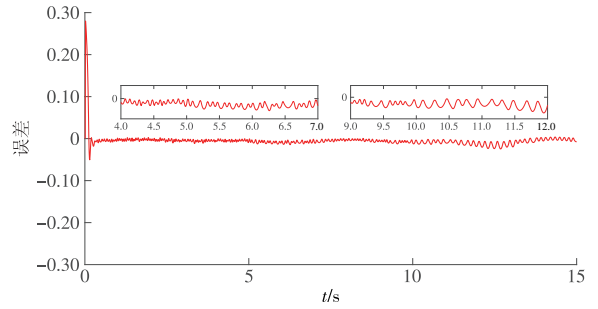


图 4 系统跟踪误差

Fig. 4 Tracking error of the system

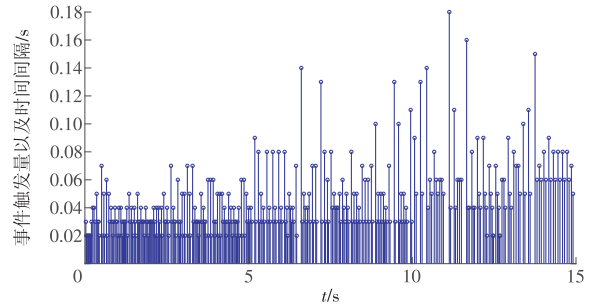


图 5 事件触发时间间隔

Fig. 5 Inter-execution intervals

仿真结果表明: 单连杆机械臂的执行器 1 在 5 s 后发生 50% 的故障, 输入输出比为 50%, 10 s 后完全失效, 预设稳定时间为 0.4 s。从图 1 可以看出, 执行器 2 正常工作的情况下, 本文提出的方法确保了单连杆机械臂的跟踪控制, 并且系统的所有信号都是有界的。从图 2 可以看出, 没有加入控制方法的执行器 1 在 5 s 后发生部分失效的情况下系统状态受到了很大的影响, 在 10 s 后完全失效的情况下进入了卡死状态, 输出不再受输入的影响。从图 3 可以看出, 采用本文提出的控制方法, 与执行器正常运行时相比, 执行器 1 在 5 s 后发生部分失效的情况下系统波动幅度较小, 在 10 s 后完全失效的情况下受到了一定的影响。图 4 的结果显示, 跟踪误差在 5 s 后出现了轻微的波动, 10 s 后出现了较大的波动, 但波动范围在预期误差范围内, 系统在 0.2 s 后误差就稳定在了 5% 内, 证明系统在设定的时间 0.4 s 内达到了预设目标状态。

从图 5 可统计得出触发量数据,见表 1。

表 1 触发量数据
Tab. 1 Number of trigger

T/s	0—2	2—4	4—6	6—8	8—10	10—12	12—14
触发次数	64	58	51	42	42	28	34

从图 5 可以看出,该方法最少可节省带宽 0.02 s,最多可节省 0.18 s。结合表 1 中的触发量数据,执行器 1 在 5 s 后发生部分失效,10 s 后完全失效,执行器 2 正常运行的情况下,在每 2 s 的时间间隔内,触发事件的数量随控制输出的变化而变化,以减少带宽资源的消耗。在传统的时间触发中,每 2 s 的触发次数为 200,而在本文涉及事件触发中,每 2 s 的平均触发次数为 46,相比之下,带宽资源节省率达 77%。

4 结束语

本文针对具有执行器故障的不确定非线性系统,提出了一种基于事件触发的规定建立时间共识自适应补偿控制方法。为了有效节省网络带宽,通过反推技术,提出了一种事件触发的有限时间补偿控制策略;同时,对于具有执行器故障的不确定非线性系统,设计了一种有限时间自适应补偿控制器,该控制器可以确保发生故障时系统状态快速收敛。引入非线性变换函数以确保跟踪误差在规定的建立时间内收敛到预定间隔;同时,提出了一种基于事件触发的规定建立时间共识自适应补偿控制方法,该方法可以统一预设有限时间,并且系统在有限时间内收敛。仿真结果表明,该方法可以保证系统的跟踪性能,实现系统状态的全局一致性和稳定性,同时避免了芝诺行为。

参考文献:

- [1] CUI Q Q, DONG W, CHEN Z X. Research on the networked control system technology applied in intelligent building [C]//2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2010:4307–4311.
- [2] CHEN C, LING L, ZHU S, et al. On-demand transmission for edge-assisted remote control in industrial network systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(7):4842–4854.
- [3] FOURATI F, ALOUINI M S. Artificial intelligence for satellite communication: A review [EB/OL]. (2021-01-01) [2021-05-25]. https://www.researchgate.net/publication/348802867_Artificial_Intelligence_for_Satellite_Communication_A_Review.
- [4] FUNABIKI N, TAKEFUJI Y, LEE K C. A neural network model for traffic controls in multistage interconnection networks [C]// International Joint Conference on Neural Networks. IEEE, 1992.
- [5] WANG Z, SUN Y, LIANG B. Synchronization control for bilateral teleoperation system with position error constraints: A fixed-time approach [J]. ISA Transactions, 2019, 93: 125–136.
- [6] SONG Y, WANG Y, HOLLOWAY J, et al. Time-varying feedback for regulation of normal-form nonlinear systems in prescribed finite time [J]. Automatica, 2017, 83:243–251.
- [7] SUN J, YANG J, LI S, et al. Sampled-data-based event-triggered active disturbance rejection control for disturbed systems in networked environment [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49: 556–566.
- [8] CHEN W, WANG J, MA K, et al. Adaptive event-triggered neural control for nonlinear uncertain system with input constraint [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2020, 30(10):3801–3815.
- [9] MAITY D, BARAS J S. Event based control of stochastic linear systems [C]// International Conference on Event-based Control, 2015.
- [10] LU H, HU Y, GUO C, et al. Cluster synchronization for a class of complex dynamical network system with randomly occurring coupling delays via an improved event-triggered pinning control approach [J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 357(4):2167–2184.
- [11] QIU A B, AL-DABBAGH A W, CHEN T W. A tradeoff approach for optimal event-triggered fault detection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2111–2121.
- [12] JING Y H, YANG G H. Adaptive fuzzy output feedback fault-tolerant compensation for uncertain nonlinear systems with infinite number of time-varying actuator failures and full-state constraints [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019:1–11.
- [13] MA H, LI H, LIANG H, et al. Adaptive fuzzy event-triggered control for stochastic nonlinear systems with full state constraints and actuator faults [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27(11): 2242–2254.
- [14] WU L B, PARK J H, XIE X P, et al. Neural network adaptive tracking control of uncertain MIMO nonlinear systems with output constraints and event-triggered inputs [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 32(2):695–707.
- [15] THEODORAKOPOULOS A, ROVITHAKIS G A. Guaranteeing preselected tracking quality for uncertain strict-feedback systems with deadzone input nonlinearity and disturbances via low-complexity control [J]. Automatica, 2015, 54:135–145.

- [16]XIA J, ZHANG J, SUN W, et al. Finite-time adaptive fuzzy control for nonlinear systems with full state constraints[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(7): 1541–1548.
- [17]HUANG X Q, LIN W, YANG B. Global finite-time stabilization of a class of uncertain nonlinear systems[J]. Automatica, 2005, 41(5): 881–888.
- [18]WANG F, CHEN B, SUN Y M, et al. Finite-time fuzzy control of stochastic nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 50(6): 2617–2626.
- [19]WANG N, HAO F. Event-triggered sliding mode control with adaptive neural networks for uncertain nonlinear systems[J]. Neurocomputing, 2021, 436: 184–197.
- [20]LIU X Y, HO D W C, XIE C L. Prespecified-time cluster synchronization of complex networks via a smooth control approach[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 50(4): 1771–1775.
- [21]ROMANYUK V A, SOVA O Y. The hierarchical control system model of wireless sensor networks using unmanned aerial vehicles [C]//2015 IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), 2015: 239–242.
- [22]ZHAO K, SONG Y, MA T, et al. Prescribed performance control of uncertain euler-lagrange systems subject to full-state constraints[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2017, 29(8): 3478–3489.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

黄堃锋(2000—),女,广东台山人,从事智能制造、机器人控制等方面的研究(E-mail:kunfenghuang@163.com)。

朱厚耀*(1985—),男,河南商丘人,实验师,硕士,从事状态监测与故障诊断、智能制造与自动化控制等方面的研究(E-mail:aizhuhouyao@126.com)。

“供需友好互动新型电力系统”专刊征稿启事

面向碳达峰、碳中和目标,构建以新能源为主体、供需两侧友好互动的新型电力系统是能源电力行业低碳化革命的重要支撑手段。预计到2060年,风电光伏装机容量占比之和将达到全网容量的60%左右。随着新能源发电机组发电容量的增加,发电出力的间歇性与电能供需实时平衡的内在矛盾使得电网对新能源的大规模消纳面临重大挑战,单一的供给侧调节模式已无法满足需求。大规模新能源一方面增强了间歇性、波动性,使得系统对需求侧灵活性资源的调节需求大幅提升,另一方面挤占了传统能源发电的空间,弱化了发电侧的调节能力。与此同时,需求侧存在大量闲置的柔性资源,通过使用人工智能、区块链、边缘计算等新型技术可增强供需友好互动,充分挖掘需求侧资源,提升调控优化效率,有效增强系统的供需实时平衡能力,提升新能源消纳能力。因此,构建供需友好互动的新型电力系统已经成为电力能源行业低碳化革命的必然要求。

为此,《华电技术》特推出“供需友好互动新型电力系统”专刊,邀请东南大学电力经济技术研究所陈涛博士、高赐威教授、宋梦副研究员担任特约主编,共同探讨双碳目标下新型电力系统供需友好互动领域发展的前沿成果、最新研究动态、工程实践现状、关键技术及未来发展方向,欢迎业内同仁踊跃投稿。

一、征稿范围(包括但不限于)

(1)供需友好互动型电力系统建模与分析方法。(2)支撑电网供需两侧友好互动及信息交互的关键技术。(3)需求侧负荷资源的建模与调节能力评估方法。(4)大规模需求侧分布式资源的控制与优化方法。(5)基于数据驱动和数字孪生等新技术手段的供需互动技术。(6)支撑供需两侧友好互动的源-网-荷等框架体系设计。(7)基于低碳目标的供需友好互动新型电力系统。(8)适用需求侧资源参与电力市场、碳排放市场的机制设计。(9)基于区块链、5G、边缘计算等新技术的需求侧聚合调节方法。(10)用户侧储能、电动汽车V2G、分布式交易等供需友好互动解决方案。

二、时间进度

专刊拟于2022年3月31日截稿,2022年5期(5月25日)后择期出版。

三、征稿要求

- (1)专刊只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。
- (2)按照《华电技术》论文格式要求使用Word软件排版,论文模板请在网站(www.hdpower.net)首页“作者中心”下载。
- (3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。
- (4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

- (1)在线投稿(推荐):登录在线采编系统(www.hdpower.net),完成在线全文投稿,欢迎投稿时推荐审稿人。
- (2)邮箱投稿:taoc@seu.edu.cn(陈博士);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。
- (3)咨询联系:刘芳 0371-58501060 13838002988;杨满成 010-63918755 13801175292。