

网络化多轴运动控制系统的容侵同步控制

顾曹源, 朱俊威[†], 张文安, 俞立, 董辉

(1. 浙江工业大学信息工程学院, 杭州 310023; 2. 浙江省嵌入式系统联合重点实验室, 杭州 310023)

摘要: 针对网络攻击下的不确定网络化多轴运动控制系统, 提出一种基于分布式中间观测器的容侵同步控制方法. 首先将不确定性分解为匹配分量和不匹配分量, 继而通过分布式中间观测器估计由执行器攻击、领航者的非零输入以及匹配不确定性分量构成的组合未知输入信号, 进而设计基于估计值的容侵同步控制协议对匹配未知输入进行有效补偿, 同时通过调节特定参数充分抑制不匹配不确定性效应, 最终得到满意的容侵同步控制性能.

关键词: 网络化多轴运动控制系统; 容侵同步控制; 分布式中间观测器; 攻击估计; 调节参数

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Intrusion-tolerant synchronous control for networked multi-axis motion control system

GU Cao-yuan, ZHU Jun-wei[†], ZHANG Wen-an, YU Li, DONG Hui

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 2. Zhejiang Joint Key Laboratory of Embedded System, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In this paper, an intrusion-tolerant synchronization control method based on the distributed intermediate observer is proposed for uncertain networked multi-axis motion control systems under network attacks. Firstly, the uncertainties are decomposed into matched and mismatched components. Then, the combined unknown input signals consisting of actuator attack, leader's non-zero input and matched uncertain components are estimated by the distributed intermediate observer. Based on the estimates, an intrusion tolerant synchronization control protocol is designed to compensate the matched unknown input effectively. At the same time, the mismatched uncertainties can be attenuated by adjusting the specific parameters. Finally, the satisfactory performance of intrusion tolerant synchronization control can be achieved.

Keywords: networked multi-axis motion control system; intrusion-tolerant synchronization control; distributed intermediate observer; attack estimation; adjustable parameter

0 引 言

运动控制系统是以机械运动的驱动设备,即以电机为控制对象,控制器为核心,电力电子、功率变换装置为执行机构,在自动控制理论指导下组成的电气传动控制系统.无论在工农业生产、交通运输、国防、航空航天还是在家用电器和电子产品中,都大量使用着各种各样的电机.此外,随着网络技术的发展,许多制造设备都通过网络组成了分布式系统,通过网络架构传输数据.网络化运动控制系统是运动控制与网络的有机融合,其主要特点为开放程度高.但系统的开放性也使得系统更容易遭到来自网络空间的攻击,导致对物理系统难以进行精确的同步控制,甚至使得系

统失去稳定.

近年来,在多轴运动控制系统的同步控制问题以及攻击检测上取得了一些研究成果.文献[1]针对大型多电机卷绕系统的分布式容错跟踪控制问题,提出了一种基于攻击补偿的分布式故障诊断方案来估计系统执行器的攻击.文献[2]主要考虑了系统在物理和网络攻击下的联合分布式攻击检测和分布式安全估计问题,为了提供局部可靠的状态估计和检测虚假数据注入攻击,构造了弹性攻击检测估计器.文献[3]利用系统自身局部信息和从邻近智能体接收到的测量信息设计滑模观测器来估计攻击.文献[4]提出了一类互联非线性系统的分散容错控制方法,其创新之

收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-08-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61803334, 61822311, 61673351); 浙江省自然科学基金项目(LQ18F030012); NFSC—浙江两化融合联合基金项目(U1709213).

责任编辑: 周彬.

[†]通讯作者. E-mail: junweizhu1001@zjut.edu.cn

处在于,无需交换子系统之间的状态信息即可实现容错控制,并利用小增益循环方法处理耦合效应.文献[5]研究了具有匹配未知非线性函数和执行器偏置故障的线性多智能体系统的分布式自适应容错控制问题.文献[6]利用基于观测器的故障估计器和改进的时滞反馈控制器,构造了容错主从同步系统,讨论了系统的全局渐近稳定性、状态能量增益的界和故障估计误差向量.文献[7-8]简述了多电机同步控制的发展.文献[9]通过最小化每个传感器在敌方攻击下的均方估计误差,设计了一个最优估计器.文献[10]提出了一种基于未知输入观测器的分布式故障检测方案,研究了编队多智能体网络的网络攻击检测与隔离问题.文献[11]针对一类非线性不确定输入-输出多智能体系统,提出了一种分布式自适应容错控制方案.文献[12]提出了一种基于反推技术的动态表面控制(DSC)设计方法来设计自适应分散跟踪容错控制器.文献[13]针对多智能体系统(MASs),提出了一种最优容错控制(FTC)方法.文献[14]提供了一种分布式方法,允许执行分布式算法的代理网络克服中间人攻击.文献[15]利用相邻信息构造了一种容错时变跟踪协议,并利用李亚普诺夫理论,证明了在执行器故障和未知控制输入的影响下,跟踪器可以实现目标的期望编队跟踪.文献[16]构造一组未知的输入观测器,并利用它们来检测和隔离网络中的故障.文献[17]针对一类非线性不确定输入-输出多智能体系统,提出了一种分布式自适应容错控制方案.文献[18]基于相邻节点的相关信息,通过分布式自适应机制,设计了一种新的容错一致性跟踪协议.文献[19]研究了一类受两种攻击的随机线性多智能体系统的分布式一致跟踪控制问题.

在已有的结果中,多数只考虑了系统受到单个攻击的情况,并且并非针对实际对象,仅仅只是数值仿真,但对于系统受到多重攻击情况下的研究结果还比较有限.同时,实际中建立的模型不可避免的存在不确定性,文献[20]虽然考虑了系统发生组合故障的情况,但没有考虑模型的不确定性,在应用于网络化多轴运动控制系统时无法达到满意的效果.基于上述分析,针对存在模型不确定性并且受到组合攻击的网络化多轴运动控制系统,本文提出一种基于分布式中间观测器的容侵同步控制方法.

本文主要贡献在于:1)考虑了多重攻击下的网络化多轴运动控制系统的容侵同步控制问题;2)考虑了系统存在模型不确定性的情况,将模型不确定

性分解为匹配不确定性分量和不匹配不确定性分量.针对匹配不确定性分量,设计基于估计值的容侵同步控制协议进行有效补偿.针对不匹配不确定性分量,通过调节特定参数充分抑制.此方法和常见的鲁棒控制方法相比,得到的闭环系统稳定性条件的保守性更小.

1 前言与问题描述

1.1 被控对象

本文所考虑的网络化多轴运动控制系统由双轴系统扩展而来.网络化多轴运动控制系统如图1和图2所示,主要由PC上位机、ARM单片机、交流伺服系统、CAN总线组成.PC上位机的工作主要是通过TCP/IP协议接收来自ARM单片机的数据,运行控制算法来处理数据,再将处理好的控制量下发给ARM单片机.ARM单片机在系统中作为数据的中转站,接收PC上位机发送的控制指令,再经过CAN总线将控制指令下发至各交流伺服系统,同时获取CAN总线上各交流伺服系统的速度、位置、力矩等关键信息,并且将这些数据封装后发送给PC上位机进行处理.CAN总线主要的工作是负责ARM单片机和交流伺服系统之间的通讯,并且实时传输重要数据.交流伺服系统主要的工作是实时响应来自PC上位机的控制指令,做出相应的运动.



图1 网络化多轴运动控制系统

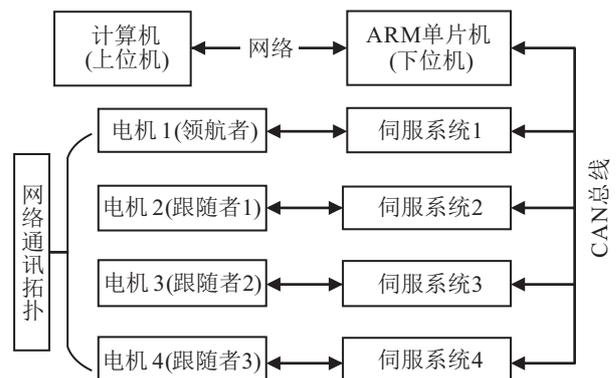


图2 系统结构

针对上述网络化多轴运动控制系统, 考虑如图 3 所示的通讯拓扑. 其中电机 2~电机 4 之间的双向箭头表示两个电机互相交换速度位置信息, 因此可以用一个邻接矩阵 $\mathcal{A} = [\mathcal{A}_{ij}] \in R^{N \times N}$ 表示它们之间的关系, 同时定义 $\mathcal{L} = [\mathcal{L}_{ij}] \in R^{N \times N}$ 为 Laplacian 矩阵, $i = 1, 2, \dots, N$.

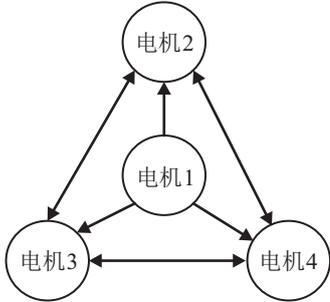


图 3 通讯拓扑

$$\mathcal{A}_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j; \\ 1, & i \text{ 和 } j; \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$$\mathcal{L}_{ij} = \begin{cases} \sum_{j=1}^N \mathcal{A}_{ij}, & i = j; \\ -\mathcal{A}_{ij}, & i \neq j. \end{cases}$$

电机 1 与电机 2、电机 3 和电机 4 之间的单向箭头表示电机 1 将自己的速度位置信息传递给电机 2、电机 3 和电机 4, 但不接收其余电机的信息, 因此可以用一个牵引矩阵表达领航者与跟随者之间的关系.

$$g_i = \begin{cases} 0, & \text{otherwise;} \\ 1, & \text{电机 1 与电机 } i \text{ 相连.} \end{cases}$$

系统之间存在网络通讯拓扑, 当系统中的任意一轴受到攻击时, 攻击效应会随着网络通讯拓扑扩散到整个系统. 因此, 本文提出一种基于分布式中间观测器的容侵同步控制方法, 通过分布式中间观测器对跟踪误差系统的状态和攻击等未知输入信号进行估计, 并基于估计值设计了容侵同步控制协议, 确保系统具有良好的容侵同步控制性能.

1.2 网络化多轴运动控制系统模型

根据伺服系统特性, 在速度模式下的伺服系统的传递函数如下所示:

$$G_i = \frac{Y_i(s)}{U_i(s)} = \frac{b_i}{s^2 + a_i s}. \quad (1)$$

其中: a_i 和 b_i 为模型的定常参数, $U_i(s)$ 为第 i 轴伺服系统的速度设定值, $Y_i(s)$ 为第 i 轴伺服系统的位置量. 令 $x_{pi}(t)$ 和 $x_{vi}(t)$ 分别表示第 i 轴伺服系统的位置

量和速度量, $u_i(t)$ 为第 i 轴系统控制输入, $y_i(t)$ 为第 i 轴系统测量输出, 对式 (1) 进行分析, 可得到网络化多轴运动控制系统模型

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{pi} \\ \dot{x}_{vi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{pi} \\ x_{vi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_i \end{bmatrix} u_i,$$

$$y_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{pi} \\ x_{vi} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

在建模的过程中误差不可避免, 因此, 本文考虑了模型的不确定性, 将领航者的系统模型记为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A + \Delta A_0)x(t) + Bu_0(t), \\ y(t) &= Cx(t). \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $x(t) \in R^n$ 为领航者的状态, $u_0(t) \in R^m$ 为领航者的输入, $\Delta A_0 = M_0 F(t) N_0$ 为模型不确定性. 跟随者的系统模型为

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= (A + \Delta A_i)x_i(t) + Bu_i(t) + Ef_i(t), \\ y_i(t) &= Cx_i(t) + Df_{si}(t). \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $x_i(t) \in R^n$ 、 $u_i(t) \in R^m$ 、 $y_i(t) \in R^p$ 分别为跟随者状态、控制输入、测量输出; $f_i(t)$ 、 $f_{si}(t)$ 、 $\Delta A_i = M_i F(t) N_i$ 分别为执行器攻击、传感器攻击和模型不确定性.

定义 $\theta_i(t) = x_i(t) - x(t)$ 作为第 i 个跟随者的跟踪误差, 由式 (3) 和 (4) 得到一个跟踪误差系统, 将传感器攻击作为新的状态变量, 对误差系统进行扩维, 得到如下增广跟踪误差系统:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\theta}}_i(t) &= \bar{A}\bar{\theta}_i(t) + \bar{B}u_i(t) - \bar{B}u_0(t) + \bar{E}f_i(t) + \\ &\quad \bar{M}_i F(t) \bar{N}_i \bar{\theta}_i(t) + \bar{M} \dot{f}_{si}(t), \\ y_i(t) &= \bar{C}\bar{\theta}_i(t). \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \bar{E} &= \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\theta}_i(t) = \begin{bmatrix} \delta_i(t) \\ f_{si}(t) \end{bmatrix}, \\ \bar{M} &= \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix}^T, \\ \bar{M}_i &= \begin{bmatrix} M_i & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{N}_i = \begin{bmatrix} N_i & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

本文的控制目标是针对上述存在网络攻击以及模型不确定性的网络化多轴运动控制系统, 设计一种基于分布式中间观测器的容侵同步控制协议, 确保全局跟踪误差系统的状态一致最终有界, 使系统具有良好的容侵同步控制性能.

2 基于分布式中间观测器的容侵同步控制

2.1 分布式中间观测器和控制协议的设计

在设计分布式中间观测器前,先对不确定性进行分解,有

$$\bar{M}_i F(t) \bar{N}_i = \bar{M}_{i1} F(t) \bar{N}_{i1} + \bar{M}_{i2} F(t) \bar{N}_{i2}. \quad (6)$$

注1 $\bar{M}_{i1} F(t) \bar{N}_{i1}$ 表示不在控制通道的不确定性,记为不匹配不确定性分量, $\bar{M}_{i2} F(t) \bar{N}_{i2}$ 表示在控制通道的不确定性,记为匹配不确定性分量.

由式(5)和(6)可得第*i*个跟随者的增广跟踪误差系统

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\theta}}_i(t) &= \bar{A} \bar{\theta}_i(t) + \bar{B} u_i(t) + \bar{B} \tau_i(t) + \\ &\quad \bar{M}_{i1} F(t) \bar{N}_{i1} \bar{\theta}_i + \bar{M} \dot{f}_{si}(t), \\ y_i(t) &= \bar{C} \bar{\theta}_i(t), \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\tau_i = -r_0(t) + \bar{B}^* \bar{E} f_i(t) + \bar{B}^+ \bar{M}_{i2} F(t) \bar{N}_{i2} \bar{\theta}_i$ 代表组合未知输入信号.

注2 由于存在较多的未知输入信号,从系统辨识的角度来说,未知输入信号的个数不能超过系统输出个数,但本文考虑的实际系统无法满足条件.因此,将领航者的非零输入、执行器攻击、匹配不确定性分量组合为一个未知信号进行估计,从而降低了对系统输出个数的要求.

将中间变量定义为

$$\eta_i(t) = \tau_i(t) - \omega \bar{B}^T \bar{\theta}_i(t), \quad (8)$$

ω 是一个调节参数,调节 ω 可以改善估计性能.对于第*i*个跟随者,设计分布式中间观测器为

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}}_i(t) &= \\ &\bar{A} \hat{\theta}_i(t) + \bar{B} \hat{\tau}_i(t) + \bar{B} u_i(t) + F(\psi_i(t) - \hat{\psi}_i(t)), \\ \dot{\hat{\eta}}_i(t) &= -\omega \bar{B}^T \bar{B} \hat{\eta}_i(t) - \omega \bar{B}^T (\bar{A} \hat{\theta}_i(t) + \\ &\quad \bar{B} u_i(t) + \omega \bar{B} \bar{B}^T \hat{\theta}_i(t)), \\ \hat{\tau}_i(t) &= \hat{\eta}_i(t) + \omega \bar{B}^T \hat{\theta}_i(t). \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} \psi_i(t) &= \sum_{j \in N_i} a_{ij} (y_i(t) - y_j(t)) + g_i (y_i(t) - y_0(t)), \\ \hat{\psi}_i(t) &= \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\bar{C} \hat{\theta}_i(t) - \bar{C} \hat{\theta}_j(t)) + g_i \bar{C} \hat{\theta}_i(t). \end{aligned}$$

$\hat{\theta}_i(t)$, $\hat{\eta}_i(t)$, $\hat{\tau}_i(t)$, $\hat{\psi}_i(t)$ 分别代表 $\bar{\theta}_i(t)$, $\eta_i(t)$, $\tau_i(t)$, $\psi_i(t)$ 的估计值.定义估计误差 $e_{\bar{\theta}_i}(t) = \bar{\theta}_i(t) - \hat{\theta}_i(t)$, $e_{\tau_i}(t) = \tau_i(t) - \hat{\tau}_i(t)$, $e_{\bar{\eta}_i}(t) = \eta_i(t) - \hat{\eta}_i(t)$.在前面的分析基础上,将第*i*个跟随者的容侵同步控制协议设计为

$$u_i(t) = -K \hat{\theta}_i(t) - \hat{\tau}_i(t), \quad (10)$$

其中 K 的取值要使得 $A - BK$ 是 Hurwitz 矩阵.

2.2 跟踪误差系统稳定性分析

将式(10)代入跟踪误差系统,得到如下全局跟踪误差系统:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}(t) &= \\ &(I_N \otimes (A - BK)) \theta(t) + (I_N \otimes (BK + \omega BB^T)) e_{\theta}(t) + \\ &(I_N \otimes B) e_{\eta}(t) + (I_N \otimes M_1 F N_1) \theta(t), \quad (11) \\ \dot{e}_{\bar{\theta}}(t) &= \\ &(I_N \otimes \bar{A}) e_{\bar{\theta}}(t) + (I_N \otimes \bar{B}) e_{\eta}(t) + \\ &(I_N \otimes \omega \bar{B} \bar{B}^T) e_{\bar{\theta}}(t) + (I_N \otimes \bar{M}) \mu(t) - \\ &(M \otimes H \bar{C}) e_{\bar{\theta}}(t) + (I_N \otimes \bar{M}_1 F \bar{N}_1) \bar{\theta}(t), \quad (12) \\ \dot{e}_{\eta}(t) &= \\ &(I_N \otimes -\omega \bar{B}^T \bar{B}) e_{\eta}(t) + (I_N \otimes -\omega \bar{B}^T \bar{A}) e_{\bar{\theta}}(t) + \\ &(I_N \otimes -\omega \bar{B}^T \bar{M}_1 F \bar{N}_1) \bar{\theta} + (I_N \otimes I_m) \dot{\tau}(t) + \\ &(I_N \otimes -\omega^2 \bar{B}^T \bar{B} \bar{B}^T) e_{\bar{\theta}}(t) + (I_N \otimes -\omega \bar{B}^T \bar{M}) \mu(t). \end{aligned} \quad (13)$$

定理1 如果存在标量 $\omega > 0, \varepsilon > 0$, 矩阵 $P_1 > 0, P_2 > 0$ 和 $P_3 > 0$, 使得

$$\phi^i < 0, \quad (14)$$

则全局跟踪误差系统的状态一致最终有界.其中 $M = L + G$, ϕ^i 的具体值如下:

$$\begin{aligned} \phi_{11}^i &= He[P_1(A - BK)], \\ \phi_{12}^i &= P_1(BK + \omega BB^T), \\ \phi_{13}^i &= P_1 B, \\ \phi_{14}^i &= N_{i1}^T, \\ \phi_{15}^i &= P_1 M_{i1}, \\ \phi_{22}^i &= He(P_2 \bar{A} + \omega P_2 \bar{B} \bar{B}^T) - He(\lambda_i H \bar{C}), \\ \phi_{23}^i &= P_2 \bar{B} - \omega \bar{A}^T \bar{B} P_3 - \omega^2 \bar{B} \bar{B}^T \bar{B} P_3, \\ \phi_{26}^i &= P_2 \bar{M}, \\ \phi_{27}^i &= P_2 \bar{M}_{i1}, \\ \phi_{33}^i &= He(-\omega P_3 \bar{B}^T \bar{B}), \\ \phi_{38}^i &= \omega P_3 \bar{B}^T M, \\ \phi_{39}^i &= P_3, \\ \phi_{44}^i &= -\frac{1}{2} \varepsilon I, \\ \phi_{55}^i &= \phi_{66}^i = \phi_{77}^i = \phi_{88}^i = \phi_{99}^i = -\varepsilon I. \end{aligned}$$

通过式(14)可得分布式中间观测器的增益

$$F = P_2^{-1} H. \quad (15)$$

证明 选择 Lyapunov 函数为

$$V(t) = \theta^T(t) (I_N \otimes P_1) \theta(t) + e_{\bar{\theta}}^T(t) (I_N \otimes P_2) e_{\bar{\theta}}(t) +$$

$$e_{\eta}^T(t)(I_N \otimes P_3)e_{\eta}(t), \quad (16)$$

对式(16)求导, 结合式(11)~(13)可得 $V(t)$ 对时间的导数

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \theta^T(t)[I_N \otimes P_1(A - BK) + (A - BK)^T P_1]\theta(t) + \\ & 2\theta^T(t)(I_N \otimes P_1(BK + wBB^T))e_{\theta}(t) + \\ & 2\theta^T(t)(I_N \otimes P_1B)e_{\eta}(t) + \\ & 2\theta^T(t)(I_N \otimes P_1M_1FN_1)\theta + \\ & e_{\bar{\theta}}^T(t)(I_N \otimes (P_2\bar{A} + \bar{A}^T P_2))e_{\bar{\theta}}(t) + \\ & 2e_{\bar{\theta}}^T(t)(I_N \otimes P_2\bar{B})e_{\eta}(t) + \\ & 2e_{\bar{\theta}}^T(t)(I_N \otimes \omega P_2\bar{B}\bar{B}^T)e_{\bar{\theta}}(t) - \\ & e_{\bar{\theta}}^T(t)(M \otimes (P_2F\bar{C} + \bar{C}^T F^T P_2))e_{\bar{\theta}}(t) + \\ & 2e_{\bar{\theta}}^T(t)(I_N \otimes P_2\bar{M}_1F\bar{N}_1)\theta + \\ & 2e_{\bar{\theta}}^T(t)(I_N \otimes P_2\bar{M})\mu(t) + \\ & 2e_{\eta}^T(t)(I_N \otimes -\omega P_3\bar{B}^T\bar{B})e_{\eta}(t) + \\ & 2e_{\eta}^T(t)(I_N \otimes -\omega P_3\bar{B}\bar{A})e_{\bar{\theta}}(t) + \\ & 2e_{\eta}^T(t)(I_N \otimes -\omega^2 P_3\bar{B}^T\bar{B}\bar{B}^T)e_{\bar{\theta}}(t) + \\ & 2e_{\xi}^T(t)(I_N \otimes -\omega P_3\bar{B}^T M)\mu(t) + \\ & 2e_{\xi}^T(t)(I_N \otimes P_3)\dot{r}(t). \end{aligned} \quad (17)$$

并且, 如下不等式总成立:

$$\begin{aligned} 2\delta^T(I_N \otimes P_1M_1F_1N_1)\delta \leq & \\ \frac{1}{\varepsilon}\delta^T(I_N \otimes N_1^T F_1^T F_1 N_1)\delta + \varepsilon\delta^T(I_N \otimes P_1M_1M_1^T P_1)\delta, & \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} 2e_{\bar{\theta}}^T(I_N \otimes P_2\bar{M}_1F_1\bar{N}_1)\delta \leq & \\ \frac{1}{\varepsilon}\delta^T(I_N \otimes \bar{N}_1^T F^T F \bar{N}_1)\delta + \varepsilon e_{\bar{\theta}}^T(I_N \otimes P_2\bar{M}_1\bar{M}_1^T P_2)e_{\bar{\theta}}. & \end{aligned} \quad (19)$$

为简便起见, 后续推导省略, 详细过程可参考文献[14]. \square

注3 传统的鲁棒控制方法对于不确定性通常采用不等式放缩的处理方式, 这会使得稳定性LMI条件的维数增加, 因而保守性也会增加. 而本文将模型不确定性分解为匹配不确定性分量和不匹配不确定性分量, 针对匹配不确定性分量进行了补偿, 避免了使用不等式放缩的处理方式, 使得保证系统稳定性的充分条件保守性更小.

2.3 基于分布式中间观测器的容侵同步控制步骤

本文提出的基于分布式中间观测器的容侵同步控制方法主要有以下几个步骤:

- 1) 获取电机运行时的数据;
- 2) 设定调节参数和反馈增益;

3) 通过式(15)计算观测器增益;

4) 利用分布式中间观测器估计系统的状态和所受到的攻击, 若输出估计误差超过给定阈值, 则重新调节参数并重新计算观测器增益;

5) 利用估计值设计具有攻击补偿的反馈控制律, 对系统进行控制;

6) 获取下一时刻的数据并更新控制律.

具体流程如图4所示.

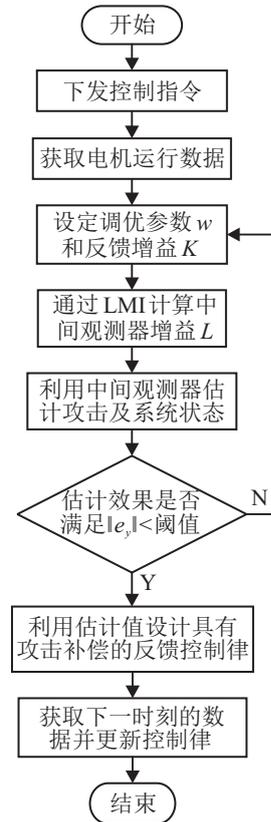


图 4 容侵同步控制流程

3 实验结果

本节中, 在网络化多轴运动控制系统实验平台运行所提出的容侵同步控制算法, 得到如下实验结果. 跟随者系统模型为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{i1} \\ \dot{x}_{i2} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -41.1015 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} 0 \\ 3.4414 \end{bmatrix} f_i(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 3.4414 \end{bmatrix} u_i(t) + \\ & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} F(t) \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix}, \\ y_i = & \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.2 \end{bmatrix} f_{si}(t). \end{aligned} \quad (20)$$

其中: $i = 1, 2, 3$, $u_i(t)$ 表示控制输入, 并且同时考虑了传感器攻击 $f_{si}(t)$ 和执行器攻击 $f_i(t)$. 领航者系统模型如式(3)所示, 设定领航者的输入为 $u_0(t) =$

$3 \sin(0.2t)$.

注4 对 $M_i F(t) N_i$ 的分解如下:

$$M_i F(t) N_i =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} F(t) \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} F(t) \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}.$$

设定反馈增益矩阵 $K = [25.2423 \quad 40.5457]$, 选择调节参数 $\omega = 1, \varepsilon = 1$, 发现估计误差超出了设定阈值 (± 0.5), 因此调节 $\omega = 2$, 并通过式(12)重新计算观测器增益

$$F = \begin{bmatrix} 39.1522 & -0.9388 \\ 7.4239 & 2.7434 \\ -41.9822 & 265.4603 \end{bmatrix}.$$

假设执行器攻击和传感器攻击分别如表1和表2所示.

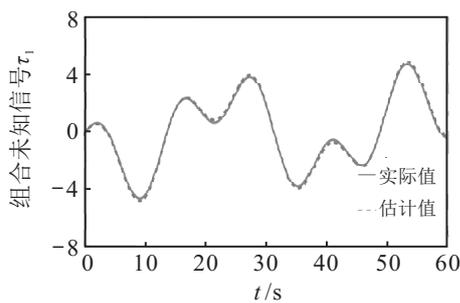
表1 执行器攻击 $f_i(t) (t \in [0s, 10s])$

跟随者	$f_i(t)$
1	$2 \sin(0.5t)$
2	$\sin(0.6t)$
3	$1.5 \sin(0.5t)$

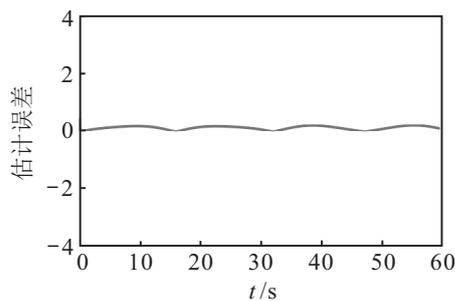
表2 传感器攻击 $f_{si}(t) (t \in [0s, 10s])$

跟随者	$f_{si}(t)$
1	$1.5 \sin(0.4t)$
2	$\sin(0.4t)$
3	$1.3 \sin(0.2t)$

图5~图7给出了组合未知信号的估计值, 但不确定实际值无法获得, 仅能提供由领航者非零输入和执行器攻击所构成的组合信号与估计值作比较.

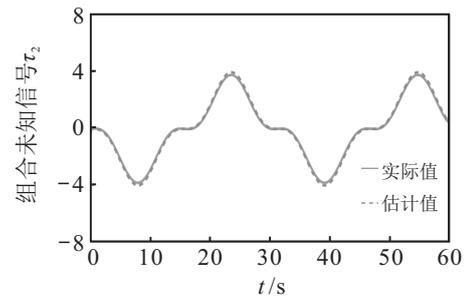


(a) τ_1 实际值及其估计

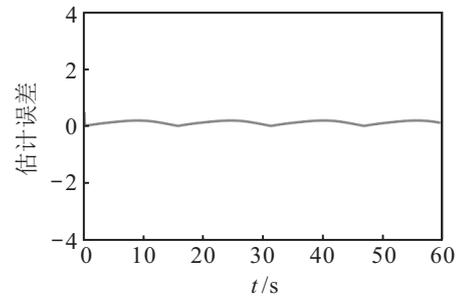


(b) τ_1 估计误差

图5 $\tau_1(t)$ 估计及其误差(跟随者1)

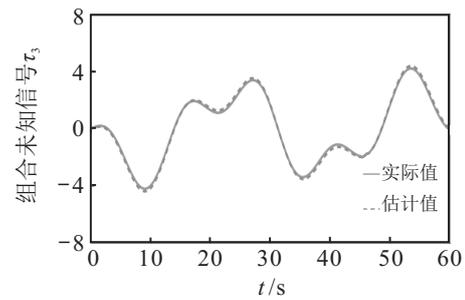


(a) τ_2 实际值及其估计

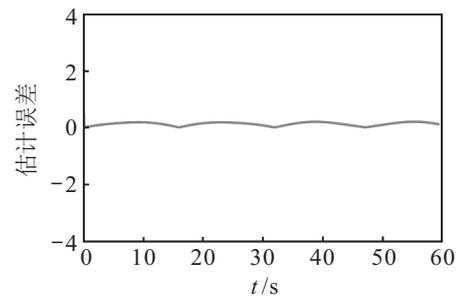


(b) τ_2 估计误差

图6 $\tau_2(t)$ 估计及其误差(跟随者2)



(a) τ_3 实际值及其估计



(b) τ_3 估计误差

图7 $\tau_3(t)$ 估计及其误差(跟随者3)

图8~图10给出了传感器攻击的实际值和估计值以及它们之间的估计误差, 并且它们的估计误差也在允许范围内 (± 0.3). 图11分别给出了领航者和跟随者状态1(位置)及状态2(速度)的曲线, 其稳态跟踪误差在 (± 0.2) 以内. 可以看出, 本文提出的基于分布式中间观测器的容侵同步控制方法不仅准确估计了系统的状态和所受到的攻击, 同时根据估计值设计的具有攻击补偿的反馈控制律, 有效确保了跟随者与领航者的状态同步, 因而具有良好的容侵同步控制性能.

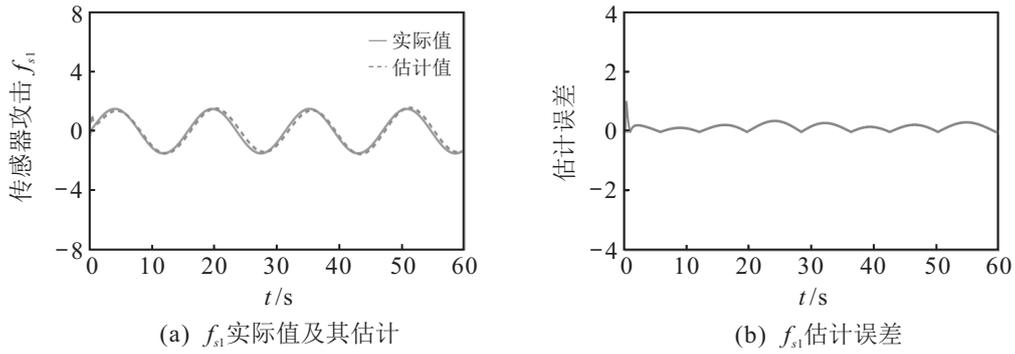


图8 $f_{s1}(t)$ 估计及其误差(跟随者1)

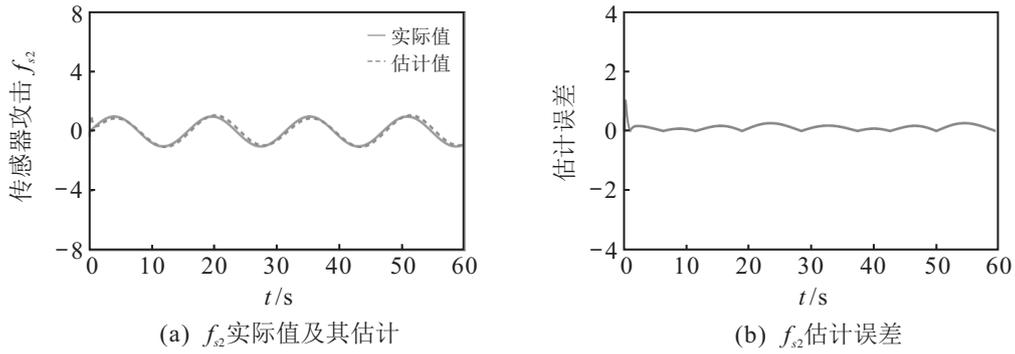


图9 $f_{s2}(t)$ 估计及其误差(跟随者2)

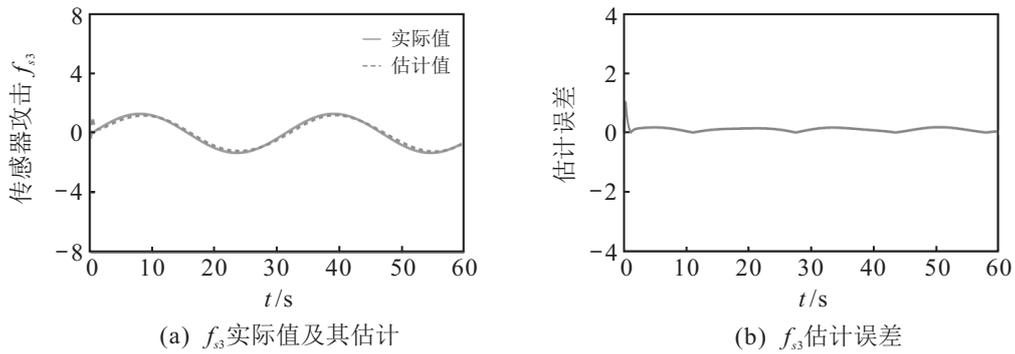


图10 $f_{s3}(t)$ 估计及其误差(跟随者3)

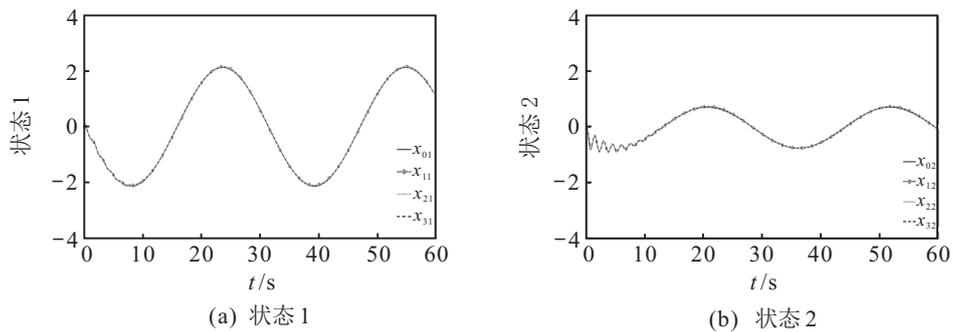


图11 状态1、状态2(位置、速度)

4 结论

本文针对多重攻击下的网络化多轴运动控制系统,提出了一种基于分布式中间观测器的容侵同步控制方法.实验结果表,该方法能够确保系统在受到多重攻击下获得较好的容侵同步控制性能.因此,本文所提出方法具有一定的实际意义.

参考文献(References)

[1] Chu X, Nian X, Wang H, et al. Distributed fault tolerant tracking control for large-scale multi-motor web-winding systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2019, 13(4): 543-553.

[2] Guan Y, Ge X. Distributed attack detection and secure estimation of networked cyber-physical systems against

- false data injection attacks and jamming attacks[J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, 2018, 4(1): 48-59.
- [3] Quan Y, Chen W, Wu Z. Distributed fault detection and isolation for leader-follower multi-agent systems with disturbances using observer techniques[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 93(2): 863-871.
- [4] Shao S, Yang H, Jiang B, et al. Decentralized fault tolerant control for a class of interconnected nonlinear systems[J]. Transactions on Cybernetics, 2018, 48(1): 178-186.
- [5] Deng C, Yang G H. Adaptive fault-tolerant control for a class of nonlinear multi-agent systems with actuator faults[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(12): 4784-4800.
- [6] Zhong M Y, Han Q L. Fault-tolerant master-slave synchronization for lur'e systems using time-delay feedback control[J]. Transactions on Circuits & Systems I: Regular Papers, 2009, 56(7): 1391-1404.
- [7] 唐红雨, 陈飞, 王翠军. 多电机同步控制系统设计与实现[J]. 电气传动, 2017, 47(6): 45-49.
(Tang H Y, Chen F, Wang C J. Design and implementation of the multi-motor synchronous control system[J]. Electric Drive, 2017, 47(6): 45-49.)
- [8] 李慧, 刘星桥, 李景, 等. 多电机同步协调系统控制策略[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(4): 6-11.
(Li H, Liu X Q, Li J, et al. Summary of multi-motor synchronization and coordination system control strategy[J]. Electric Machines & Control Application, 2014, 41(4): 6-11.)
- [9] Lei L, Yang W, Yang C. False data injection attack on consensusbased distributed estimation[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2016, 27(1): 1419-1432.)
- [10] Negash L, Kim S H, Choi H L. Distributed observes for cyberattack detection and isolation in formation-flying unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2017, 14(10): 551-565.
- [11] Khalili M, Zhang X D, Cao Y C, et al. Distributed fault-tolerant control of high-order input-output multi-agent systems[J]. FAC-PapersOnLine, 2018, 51(24): 453-458.
- [12] Tong S, Sui S, Li Y. Adaptive fuzzy decentralized tracking fault-tolerant control for stochastic nonlinear large-scale systems with unmodeled dynamics[J]. Information Sciences, 2014, 289(24): 225-240.
- [13] Dehshalie M E, Menhaj M B, Karrari M. Fault tolerant cooperative control for affine multi-agent systems: An optimal control approach[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(3): 1360-1378.
- [14] Oliva G, Cioaba S, Hadjicostis C N. Distributed calculation of edge-disjoint spanning trees for robustifying distributed algorithms against man-in-the-middle attacks[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2018, 5(4): 1646-1656.
- [15] Hua Y Z, Dong X W, Li Q D, et al. Fault-tolerant time-varying formation tracking for second-order multi-agent systems with actuator faults and a non-cooperative target[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(24): 68-73.
- [16] Shames I, André M H Teixeira, Sandberg H. Distributed fault detection for interconnected second-order systems[J]. Automatica, 2011, 47(12): 2757-2764.
- [17] Khalili M, Zhang X D, Cao Y C, et al. Distributed fault-tolerant control of high-order input-output multi-agent systems[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(24): 453-458.
- [18] Wang X, Yang G H. Distributed fault-tolerant control for a class of cooperative uncertain systems with actuator failures and switching topologies[J]. Information Sciences, 2016, 370(20): 650-666.
- [19] Feng Z, Hu G, Wen G. Distributed consensus tracking for multi-agent systems under two types of attacks[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2016, 26(5): 896-918.
- [20] Zhu J, Yang G, Zhang W, et al. Cooperative fault tolerant tracking control for multiagent systems: An intermediate estimator-based approach[J]. Transactions on Cybernetics. 2018, 48(10): 2972-2980.

作者简介

顾曹源(1996—), 男, 硕士生, 从事信息物理系统安全的研究, E-mail: 164044476@qq.com;

朱俊威(1985—), 男, 副教授, 博士, 从事信息物理系统安全等研究, E-mail: junweizhu1001@zjut.edu.cn;

张文安(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 从事信息物理系统安全等研究, E-mail: wazhang@zjut.edu.cn;

俞立(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事信息物理系统安全等研究, E-mail: lyu@zjut.edu.cn;

董辉(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 从事信息物理系统安全等研究, E-mail: hdong@zjut.edu.cn.

(责任编辑: 孙艺红)