

有向拓扑下网络化运动控制系统的容侵同步控制

董云帆, 朱俊威, 顾曹源

(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

摘要: 针对有向通信拓扑下网络化多轴运动控制系统受到网络攻击威胁及未建模不确定性影响, 其轨迹同步控制精度迅速下降, 提出了一种基于分布式中间观测器的容侵同步控制方法; 首先将非线性未建模不确定性分解成控制通道匹配分量和不匹配分量, 进而将攻击、领航者的参考输入和非线性匹配部分合并成一个组合未知输入信号, 通过设计分布式中间观测器对跟踪误差系统的状态、组合未知输入信号进行估计并设计容侵同步控制协议; 利用李雅普诺夫函数证明跟踪误差系统稳定性; 网络化多轴运动控制系统的实验结果表明所提方法能够保证系统具有良好的容侵同步控制性能, 并且能够通过调节特定参数确保跟踪误差系统对于不匹配非线性不确定性的鲁棒性。

关键词: 网络化多轴运动控制系统; 有向通信拓扑; 分布式中间观测器; 容侵同步控制; 调节参数; 鲁棒性

Intrusion-tolerant Synchronization Control for Networked Motion Control System Under Directed Topology

Dong Yunfan, Zhu Junwei, Gu Caoyuan

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Under the threat of cyber-attack and unmodelled uncertainty, the synchronization control performance for the multi-axis networked motion control system with directed graphs may deteriorate rapidly, hence a distributed intrusion-tolerant synchronization control method based on distributed intermediate observer was proposed for case with directed graphs. The nonlinear unmodelled uncertainty was decomposed into matched component and mismatched component respectively. The attack, the leader's unknown input and the matched uncertainty were combined as one signal, then the states of the tracking error and the combined signal were estimated by the designed distributed intermediate estimator. Based on the estimates, an intrusion-tolerant synchronization control protocol was designed. The tracking error system was proved to be stable via Lyapunov analysis. The experimental results show that the proposed method guarantees the multi-axis motion control system to have a good intrusion-tolerant and synchronization control performance, meanwhile, the robustness can be ensured by adjusting specific parameters.

Keywords: networked motion control system; directed topology; distributed intermediate observer; intrusion-tolerant synchronization control; adjustable parameter; robustness

0 引言

运动控制是现代机电领域的重要支柱, 其不仅要求实现对单轴系统的速度、位置等物理量的控制, 更要提高具有运动协调关系的多轴系统间的同步控制精度。对于纺织印刷机械、数控机床、机器人等复杂设备, 多轴之间的同步运动是保证控制性能、提高产品质量的关键。

另一方面, 随着网络通信技术的普及, 网络化给现代运动控制注入了活力。运动控制网络化的应用, 为多轴控制带来了巨大便利, 同时也为多轴系统的同步控制精度带

来了更大的挑战。

网络化运动控制系统是运动控制系统与网络通信技术的有机结合, 系统的一大特点为开放程度高。因而, 系统更容易遭受到来自网络空间的攻击, 导致同步控制性能恶化, 甚至可能使系统失去稳定性。

近年来, 学界在网络化容侵同步控制方面已经取得了一系列成果。Shao 等^[1]提出了一种互联非线性系统的分散容错控制方法, 不必在子系统之间交换状态即可实现容错控制, 并利用小增益循环的方法来处理耦合效应。Zhong 等^[2]利用基于故障估计器设计的时延反馈控制器构造容错主从同步系统, 并得到了确保同步误差系统稳定性的充分条件。Negash 等^[3]提出了一种基于未知输入观测器的分布式故障检测方案, 研究了编队飞行无人机的网络攻击检测和隔离问题。Cao 等^[4]讨论了带有未知外部干扰的线性多智能体系统跟踪控制问题, 提出一种基于分布式扩维状态观测器的跟踪控制策略。Wang 等^[5]研究了一类高阶多智能体系统的分布式容错控制问题, 通过分布式自适应机制

收稿日期: 2019-08-15; 修回日期: 2019-09-05。

基金项目: 国家自然科学基金(61803334); 浙江省自然科学基金(LQ18F030012)。

作者简介: 董云帆(1997-), 女, 浙江嘉兴人, 本科生, 主要从事信息物理系统的网络安全等方向的研究。

朱俊威(1985-), 男, 浙江台州人, 博士, 副教授, 主要从事故障诊断、容错控制等方向的研究。

为每个跟随节点设计了一种新型容错跟踪控制协议。Zuo 等^[6]研究了一类利普希茨非线性多智能体系统在执行器故障和领导者未知输入有界情况下的故障跟踪控制问题,提出了一种自适应容错控制协议,通过在线估计执行器故障来更新参数并实现跟踪控制。Chen 等^[7]研究了分布式自适应协议在多智能体系统中的容错一致性问题,提出了一种分布式协议增益更新机制,实现了无领导者多智能体系统的分布式连续自适应容错一致性协议设计。在此基础上,提出了一种适用于多智能体系统的分布式容错领导-跟随者一致性协议。Zhang 等^[8]在有向通信拓扑结构下,利用线性矩阵不等式(LMI)研究了一种基于自适应观测器的分布式故障估计观测器,根据每个智能体的相对输出估计误差,构造各自的故障估计观测器。Ren 等^[9]研究二阶非线性随机多智能体系统的领导跟随一致性问题,其中每个跟随者的速度是不可测量的,因而为每个跟踪器建立分布式的“降阶观测器”来估计其未知速度,进而提出了一种基于无向连接拓扑结构的分布式控制器,证明了在逆步控制方法下,随机多智能体系统的一致误差可以收敛到原点附近的一个小区域。Li 等^[10]研究了具有外部干扰和执行器/传感器故障的交换网络化控制系统(SNCSs)问题。同时,在通信网络中考虑了网络诱导时延、丢包和包无序等通信约束,提出了一种基于观测器和二阶离散自适应滑模函数的鲁棒自适应滑模控制方法,进而证明了滑模面的可达性。

多智能体容错控制方面的结果多集中于状态反馈控制策略,近年来也出现了少量多智能体输出反馈容错控制问题的研究结果。如文献[11]考虑了无向通信拓扑下的多智能体系统容错控制问题,而文献[12]则考虑了有向通信拓扑下的多智能体系统鲁棒跟踪控制问题。需要指出,实际系统中往往非线性未建模不确定性,已有文献如[13]通常假设非线性不确定性结构已知且满足利普希茨条件,这样处理往往会使得系统稳定性条件具有很大的保守性。

根据上述分析,本文针对带有一般有向通信拓扑的不确定网络化多轴运动控制系统的容侵同步控制问题展开研究,提出了一种有向拓扑下基于分布式中间观测器的容侵同步控制方法。将未知非线性不确定性分解为匹配和不匹配分量,对匹配分量进行补偿控制,同时通过调节特定参数对不匹配分量进行有效抑制。

1 网络化多轴运动控制系统

1.1 网络化多轴运动控制系统组成和工作原理

本文所考虑的网络化多轴运动控制系统实物图与结构图如图 1~2 所示,左侧为多轴同步系统,右侧为双轴雕刻机系统。其系统构成主要由 PC(上位机)、ARM 单片机(下位机)、交流伺服系统、电机和 CAN 总线组成。其中 ARM 单片机采用 STM32F407 开发板。它是基于 ARM 的 Cortex TM—M4 为内核的 STM32F407 系列高性能微处理器。拥有集成度高、数据传送速度快、外设扩展性强、接口支持多样性强等特点,满足了网络化多轴运动控制系统

对处理器的要求。交流伺服电机为台达 ASDA—A2—M,其采用高速数字信号处理器(DSP),配合增益自动调整、指令平滑功能的设计以及软件分析与监控,可达到高速位移、精准定位等运动控制需求,其内置运动控制模式,支持多种轴控操作需求,内含电子凸轮功能(CAM function),便利机台之行程规划。CAN 总线属于现场总线的范畴,它是一种有效支持分布式控制或实时控制的串行通信网络基于 CAN 总线的分布式控制系统在以下方面具有明显的优越性:1) 网络各节点之间的数据通信实时性强,网络中的各节点都可根据总线访问优先权(取决于报文标识符)采用无损结构的逐位仲裁的方式竞争向总线发送数据,且 CAN 协议废除了站地址编码,而之以对通信数据进行编码,这可使不同的节点同时接收到相同的数据,这些特点使得 CAN 总线构成的网络各节点之间的数据通信实时性强,并且容易构成冗余结构,提高系统的可靠性和系统的灵活性;2) 开发周期短,CAN 具有的完善的通信协议可由 CAN 控制器芯片及其接口芯片来实现,从而大大降低系统开发难度,缩短了开发周期;3) 已形成国际标准的现场总线,与其它现场总线比较而言,CAN 总线是具有通信速率高、容易实现、且性价比高等诸多特点的一种已形成国际标准的现场总线。

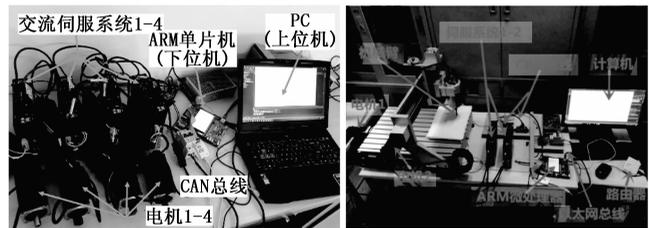


图 1 多轴运动控制系统

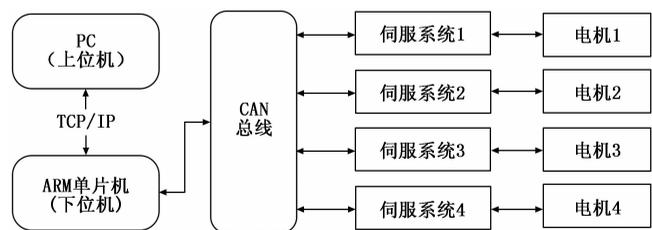


图 2 系统结构

该系统的主要控制过程为:上位机通过 TCP/IP 协议接收来自下位机的数据信息并根据控制算法更新控制律,并将新的控制指令下发至下位机。下位机作为中转站,接收上位机的控制指令,将 TCP/IP 协议数据包重新封装为 CAN 总线数据包,并通过 CAN 总线将其传输至各交流伺服系统。同时,下位机通过 CAN 总线实时获取各交流伺服系统的速度、位置、力矩等信息,并将这些数据封装成 TCP/IP 协议数据包后发送至上位机。CAN 总线连接下位机与交流伺服系统之间的通讯,并实时传输数据。最终,交流伺服系统实时响应来自上位机的控制指令,并使电机或电机驱动的机械臂做出相应的运动响应。

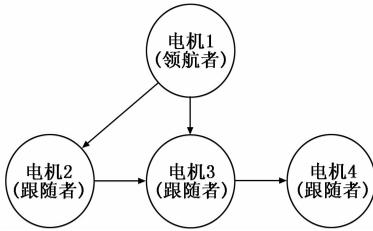


图3 通信拓扑

针对上述多轴运动控制系统。考虑其存在如图3所示的有向通信拓扑图。有向通信相比无向通信,对实际多轴运动控制系统更具适用性。无向通信需满足双向通信,而有向通信只需要满足单向通信即可,使得通信网络计算交换能力更低,可以大大简化系统复杂度,也能节约系统成本。其中,电机间的单向箭头表示该节点的测量输出信息可以发送给另一个对象,但不接受信息的反向传递。

定义邻接矩阵 $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$, 其中 $a_{ii} = 0$; 当 $(i, j) \in \varepsilon$ 时, $a_{ij} = 1$; 否则 $a_{ij} = 0$ 。牵引矩阵 $\mathbf{D} = \text{diag}\{d_i\} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 和 Laplacian 矩阵 $\mathbf{L} = [l_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 来表示电机间的信息传递关系。在有向通信拓扑情况下, \mathbf{S} 和 \mathbf{L} 均为非对称矩阵。上述矩阵定义如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & (i, j) \in \varepsilon \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$l_{ij} = \begin{cases} \sum_{j=1}^N s_{ij}, & i = j \\ -s_{ij}, & i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

$$d_i = \begin{cases} 1, & \text{信息从节点1发送至节点}i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

由于电机间存在一定的网络通信拓扑,当多轴运动控制系统中的任意一轴受到外部攻击时,攻击效应会随着拓扑结构扩散到整个系统,从而影响系统性能。因此,本文针对有向通信拓扑下的不确定网络化多轴运动控制系统,提出了一种基于中间观测器的容侵同步控制方法,确保系统具有良好的容侵同步性能。

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,对系统模型进行辨识,得到伺服系统的传递函数如下所示:

$$G_i = \frac{Y_i(s)}{U_i(s)} = \frac{b_i}{s^2 + a_i s} \quad (4)$$

其中: a_i, b_i 为模型的定常参数, $U_i(s)$ 为多轴伺服系统轴 i 的速度设定值, $Y_i(s)$ 为多轴伺服系统轴 i 的位置设定值。 $x_{pi}(t)$ 和 $x_{vi}(t)$ 分别为系统轴 i 的位置量和速度量, $u_i(t)$ 为系统轴 i 的控制输入, $y_i(t)$ 为系统轴 i 的测量输出。

根据上文分析,在该控制系统中共有一个领航者(电机1)和三个跟随者(电机2、3和4)。将式(4)转化为状态空间方程,并考虑系统建模非线性误差,得到领航者的系统模型为:

$$\dot{x}_0(t) = Ax_0(t) + Br_0(t) + G(t, x_0(t)) \quad (5)$$

$$y_0(t) = Cx_0(t) \quad (6)$$

其中: $x_0(t) \in \mathbf{R}^n$ 是领航者的状态, $y_0(t) \in \mathbf{R}^m$ 是领航者的测量输出, $r_0(t)$ 是领航者的输入, $G(t, x_0(t)) \in \mathbf{R}^n$ 是未知非线性函数,表示系统未建模不确定性。 A, B 和 C 为适当维度的常数矩阵。

考虑如下带有建模非线性误差和执行器攻击的跟随者系统模型:

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + B(u_i(t) + f_i(t)) + G(t, x_i(t)) \quad (7)$$

$$y_i(t) = Cx_i(t) \quad (8)$$

$i = 1, 2, \dots, N$, 其中 $x_i(t) \in \mathbf{R}^n, u_i(t) \in \mathbf{R}^m, f_i(t) \in \mathbf{R}^m, y_i(t) \in \mathbf{R}^p, G(t, x_i(t))$ 分别为第 i 个追随者的状态、控制输入、执行器攻击、测量输出和非线性部分,且满足 $m \leq p \leq n$ 。

定义第 i 个跟随者的跟踪误差 $\delta_i(t) = x_i(t) - x_0(t)$ 。由式(5)~(8)可以得到第 i 个跟随者的跟踪误差系统:

$$\dot{\delta}_i(t) = A\delta_i(t) + Bu_i(t) + B\eta_i(t) + G(t, \delta_i(t)) \quad (9)$$

其中: $\eta_i(t) = f_i(t) - r_0(t), G_e(t) = G(t, x(t)) - G(t, x_0(t))$ 。

将 $G_e(t)$ 分解为 $G_{e1}(t)$ 和 $G_{e2}(t)$ 。其中, $G_{e1}(t)$ 为匹配非线性部分, $G_{e2}(t)$ 为不匹配非线性部分。则式(9)可以重写为:

$$\dot{\delta}_i(t) = A\delta_i(t) + Bu_i(t) + B\eta_i(t) + G_{e2}(t) \quad (10)$$

将执行器攻击、领航者的参考输入和非线性部分重新合并成一个组合未知信号:

$$\eta_i(t) = f_i(t) - r_0(t) + B^* G_{e1}(t)$$

本文的控制目标是针对有向拓扑下网络化多轴运动控制系统,设计容侵同步控制协议,确保跟踪误差系统的状态一致最终有界。

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

先定义中间变量为:

$$\xi_i(t) = \eta_i(t) - \omega B^T \delta_i(t) \quad (11)$$

其中: $\omega > 0$ 是一个可调参数。需要指出, ω 是分布式中间观测器的关键参数,实际上, ω 和观测器的收敛速度相关,同时通过调节 ω 可以改善分布式观测器的跟踪估计性能。

根据式(10)~(11),设计第 i 个跟随者的分布式中间观测器为:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\delta}}_i(t) &= A\hat{\delta}_i(t) + Bu_i(t) + B\hat{f}_i(t) + \\ & cF \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} (y_j(t) - y_i(t)) + g_i(y_i(t) - y_0(t)) - \right. \\ & \left. \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} (C\hat{\delta}_j(t) - C\hat{\delta}_i(t)) + g_i C\hat{\delta}_i(t) \right) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\hat{\eta}_i(t) = \hat{\xi}_i(t) + \omega B^T \delta_i(t) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\xi}}_i(t) &= -\omega B^T (A\hat{\delta}_i(t) + Bu_i(t) + \\ & B\hat{\xi}_i(t) + \omega B B^T \hat{\delta}_i(t)) \end{aligned} \quad (14)$$

其中: $\hat{\delta}_i(t), \hat{\xi}_i(t), \hat{\eta}_i(t)$ 分别代表 $\delta_i(t), \xi_i(t), \eta_i(t)$ 的估计值, c 和 F 为观测器的反馈增益。

定义观测器估计误差分别为 $e_{\delta_i}(t) = \delta_i(t) - \hat{\delta}_i(t), e_{\xi_i}(t) = \xi_i(t) - \hat{\xi}_i(t), e_{\eta_i}(t) = \eta_i(t) - \hat{\eta}_i(t)$ 。

根据上文的分析, 设计第 i 个跟随者的容侵同步控制协议为:

$$u_i(t) = -K\hat{\delta}_i(t) - \hat{\eta}_i(t) \quad (15)$$

其中: K 为控制器增益, 其取值可通过令 $A - BK$ 为 Hurwitz 矩阵获得。

在一般有向通信拓扑条件下, 每个跟随者电机依据通信拓扑结构与相邻电机交换测量输出信息, 并通过生成树的信息传递机制确保能够与领航者电机的跟踪误差进行实时在线估计并实现同步控制。

2.2 跟踪误差系统稳定性分析

将上文设计的协议代入跟踪误差系统, 得到如下全局跟踪误差系统其中, 其中 $M = L + D$:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}(t) = & (I_N \otimes (A - BK))\delta(t) + (I_N \otimes BK)e_{\delta}(t) + \\ & (I_N \otimes B)e_{\xi}(t) + (I_N \otimes \omega BB^T)e_{\delta}(t) + \\ & (I_N \otimes G_{e_2}(t)) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_{\delta}(t) = & (I_N \otimes A)e_{\delta}(t) + (I_N \otimes B)e_{\xi}(t) + \\ & (I_N \otimes \omega BB^T)e_{\delta}(t) - (cM \otimes FC)e_{\delta}(t) + \\ & (I_N \otimes G_{e_2}(t)) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_{\xi}(t) = & (I_N \otimes -\omega B^T B)e_{\xi}(t) + (I_N \otimes -\omega B^T A)e_{\delta}(t) + \\ & (I_N \otimes -\omega^2 B^T BB^T)e_{\delta}(t) + (I_N \otimes I_m)\dot{\eta}(t) + \\ & (I_N \otimes G_{e_2}(t)) \end{aligned} \quad (18)$$

它在有向通信拓扑情况下, 矩阵 M 为非对称阵, 导致无法直接求解观测器增益。为解决该问题, 本文设计观测器增益形式 $F = P_2^{-1}C^T$ 。

定理 1: 如果给定标量 $\omega > 0, \epsilon > 0$, 若存在矩阵 $P_j > 0, j = 1, 2, 3$ 以及参数 $c > 0$, 使得:

$$\Phi^i = \begin{bmatrix} \Phi_{11}^i & \Phi_{12}^i & P_1 B & P_1 & 0 & 0 & 0 \\ * & \Phi_{22}^i & \Phi_{23}^i & 0 & P_2 & P_3 & 0 \\ * & * & \Phi_{33}^i & 0 & 0 & 0 & P_3 \\ * & * & * & -\epsilon & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\epsilon & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -\epsilon & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -\epsilon \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

其中: $\Phi_{11}^i = He[P_1(A - BK)], \Phi_{12}^i = P_1 BK + \omega P_1 BB^T, \Phi_{22}^i = He(P_2 A + \omega P_2 BB^T - 2c\lambda_i C^T C), \Phi_{23}^i = P_2 B - \omega A^T B P_3 - \omega^2 BB^T B P_3, \Phi_{33}^i = He(-\omega P_3 B^T B)$ 。

则全局跟踪误差系统的状态一致最终有界。给定分布式中间观测器的增益 F 为 $F = P_2^{-1}C^T$ 。

证明: 选择 Lyapunov 函数为:

$$V(t) = \delta^T(t)(I_N \otimes P_1)\delta(t) + e_{\delta}^T(t)(I_N \otimes P_2)e_{\delta}(t) + e_{\xi}^T(t)(I_N \otimes P_3)e_{\xi}(t) \quad (20)$$

对上式求导, 结合 (17) ~ (19) 可以得到 $V(t)$ 关于

时间的导数, 并且, 存在一个标量 $\theta_{\eta} \geq 0$ 以及 $G_{e_2}(t) \leq \|\theta_G\|$ 使得如下不等式 (22) ~ (25) 总是成立:

$$2e_{\xi}^T(t)(I_N \otimes P_3)\dot{\eta}(t) \leq \frac{1}{\epsilon}e_{\xi}^T(t)(I_N \otimes P_3 P_3)e_{\xi}(t) + \epsilon\theta_{\eta} \quad (21)$$

$$2\delta^T(t)P_1 G_2(t, \delta(t)) \leq \frac{1}{\epsilon}\delta^T(t)P_1^2 \delta(t) + \epsilon\theta_G \quad (22)$$

$$2e_{\delta}^T(t)P_2 G_2(t, \delta(t)) \leq \frac{1}{\epsilon}e_{\delta}^T(t)P_2^2 e_{\delta}(t) + \epsilon\theta_G \quad (23)$$

$$2e_{\xi}^T(t)P_3 G_2(t, \delta(t)) \leq \frac{1}{\epsilon}e_{\xi}^T(t)P_3^2 e_{\xi}(t) + \epsilon\theta_G \quad (24)$$

为简便起见, 后续推导省略, 详细过程可参考文献 [12]。证毕。

由于实际系统中往往非线性未建模不确定性, 而已有文献如 [13] 通常假设非线性不确定性结构已知且满足利普希茨条件, 这样处理往往会使得系统稳定性条件具有很大的保守性。本文方法将未知非线性不确定性进行分解, 对匹配分量进行补偿控制, 同时通过调节特定参数对不匹配分量进行有效抑制, 从而减少了不等式放缩给闭环系统稳定性带来的保守性。

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) 获取领航者和跟随者电机运行时的位置数据;
- 2) 设定调节参数 ω 和系统反馈增益矩阵 K ;
- 3) 计算观测器增益 c 和 F ;
- 4) 利用分布式中间观测器对跟踪误差系统的状态和组合未知信号进行估计。若输出信息估计误差超过阈值, 则重新调节参数重新计算观测器增益 c 和 F , 直至输出估计误差小于阈值为止;

5) 利用估计值设计反馈控制律, 对信号进行实时补偿, 完成对多轴运动系统的容侵同步控制;

- 6) 获取下一时刻的数据, 重复上述 2) ~ 5) 步骤。

上述具体流程如图 (4) 所示。

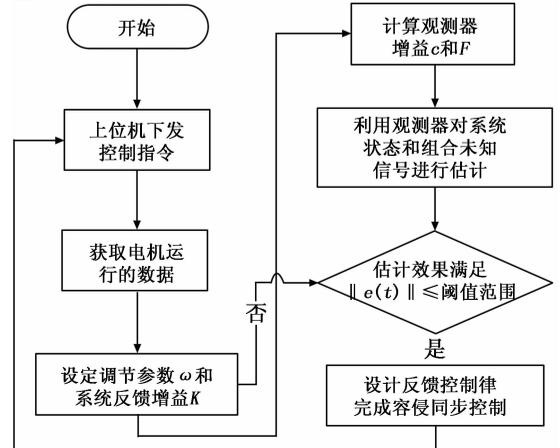


图 4 容侵同步控制流程图

3 实验结果与分析

为说明前述容侵同步控制方法的有效性, 本节给出了在网络化多轴运动控制系统上的实验结果。

网络化多轴运动控制系统的上位机界面是使用 Microsoft Visual Studio 2015 编写的。Microsoft Visual Studio 是美国微软公司的开发工具包系列产品, 是一个基本完整的开发工具集, 它包括了整个软件生命周期所需要的大部分工具, 如 UML 工具、代码管控工具、集成开发环境 (IDE) 等等, 能够帮助开发人员打造跨平台的应用程序及创建跨平台运行的 ASP.NET 5 网站, 从 Windows 到 Linux、甚至 iOS 和 Android 都可以轻松搞定。上位机操作界面主要由 C++ 语言进行编写, 并结合 MFC 制作人机交互界面。连接服务器 (ARM 单片机) 时需要将本机 IP 设置为和服务器 IP 同簇。同时由于系统传递函数是在速度模式下辨识得到的, 因此需要将算法写入速度模式, 并将组合未知信号及其估计和系统状态等所需要的曲线实时显示在上位机平台的画图区域内。

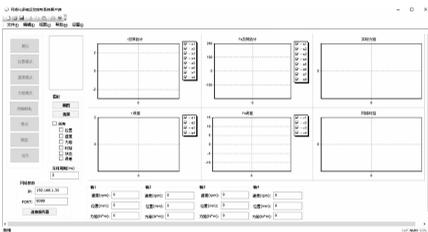


图 5 网络化多轴运动控制系统上位机界面

各个电机系统参数为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -41.1015 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 3.4414 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

并设置执行器攻击分别为:

$$f_1(t) = \sin(0.5t), f_2(t) = 0.8\sin(0.6t), f_3(t) = 1.5\sin(0.4t)$$

领航者的输入 $r_0(t)$ 对于所有跟随者是非可见的。假设其为: $r_0(t) = 0.5\sin(0.2t)$ 。根据领航者和跟随者的有向图通信拓扑结构图 3 以及容侵同步控制协议式 (15), 设定系统反馈增益矩阵 $K = [14.6698 \quad 23.5635]$, 调节参数 $\omega = 4$ 。根据式 (19) 计算得到观测器增益: $c = 2385.9, F = [0.0469 \quad 0.6023]^T$ 。

利用观测器对系统状态和未知信号进行估计, 发现误差超出了设定阈值 (± 0.5), 不满足设定的性能指标, 因此对参数进行调节使 $\omega = 4.5$, 并重新根据式 (19) 计算观测器增益: $c = 9871.6, F = [0.0325 \quad 0.8044]^T$ 。

图 6~8 分别给出了组合未知信号 $\eta_i(t)$ 的估计值及其误差, 并且各自的估计误差均在允许范围内 (± 0.5)。然而由于不确定实际值无法获得, 因此我们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。其中, 黑线代表组合未知信号的实际值, 蓝线表示组合未

知信号的估计值。图 9 给出了领航者和跟随者的状态 1 (位置) 和状态 2 (速度) 的跟踪曲线, 可以看出, 其稳态跟踪误差也均在允许范围内。

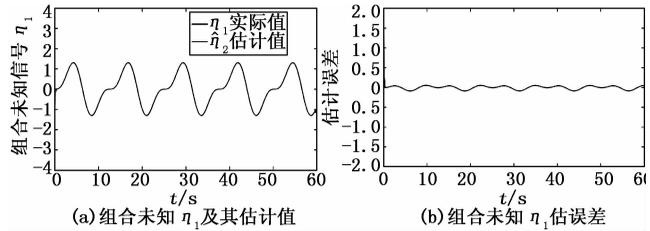


图 6 η₁ 估计以及误差

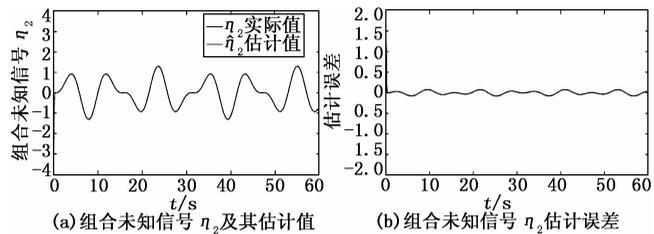


图 7 η₂ 估计以及误差

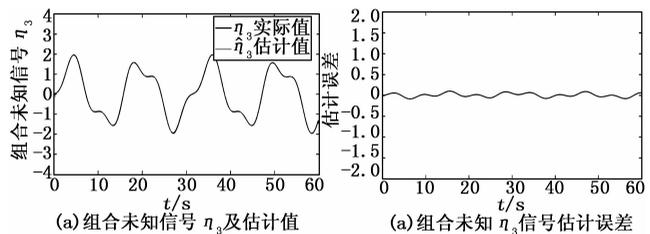


图 8 η₃ 估计以及误差

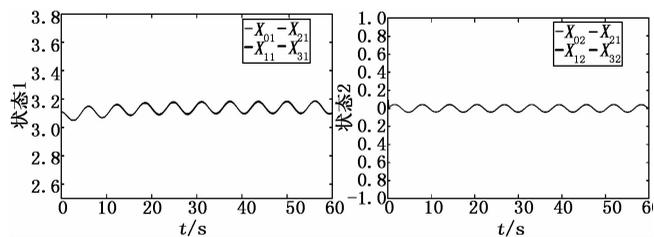


图 9 状态 1、2 跟踪曲线

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位置 (状态 1)、速度 (状态 2) 以及组合未知信号 (包含攻击信号、领航者输入以及未建模不确定性), 同时根据估计值设计的具有攻击补偿的反馈控制律, 有效确保了跟随者电机与领航者电机的状态同步, 因而具有良好的容侵同步控制性能。

4 结束语

本文针对执行器攻击下有向拓扑的网络化运动控制系统, 提出了一种基于分布式中间观测器的容侵同步控制方法, 通过设计分布式中间观测器估计系统所受到的攻击, 并且利用系统状态值和攻击估计值设计容侵同步控制协议,

(下转第 118 页)