
分类号：O231.3

单位代码：10363

密 级：公开

学号：2211020140

题 目 多智能体系统的动态事件触发脉冲控制

英文并列

题 目 DYNAMIC EVENT-TRIGGERED IMPULSIVE
CONTROL OF DISCRETE MULTI-AGENT
SYSTEMS

论 文 作 者： 张东元

指 导 教 师： 吴小太 教授

学 科（专业）： 数学

研 究 方 向： 随机控制理论及应用

论文答辩日期： 2024 年 5 月 29 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：张东元

日期：2024 年 5 月 29 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：张东元

指导教师签名：吴小东

日期：2024 年 6 月 1 日

日期：2024 年 6 月 1 日

多智能体系统的动态事件触发脉冲控制

摘 要

多智能体系统是指多个智能体通过网络互联构成的分布式系统,具有单一智能体无法比拟的信息分析和处理能力,在智能电网、航空航天、人工智能等领域被广泛应用。如果系统中包含领导者智能体,则可将系统建模为领导-跟随多智能体系统。在设计的集中或分布式控制协议作用下,跟随者智能体将最终涌现出与领导者相同的动力学行为,此时称被控系统实现了领导-跟随一致性。近年来,融合脉冲控制和事件触发控制优点的静态或动态事件触发脉冲控制策略引起了研究者的重视。该机制能够根据智能体状态的演变有选择地触发控制器并在一系列离散时刻作用于被控目标,从而有效节约控制资源。事实上,多智能体系统的通信网络还面临网络攻击的威胁,例如拒绝服务攻击和欺骗攻击。综上,本文考虑网络攻击等因素,研究了领导-跟随多智能体系统的动态事件触发脉冲控制问题。整体内容安排如下:

第 1 章阐述了多智能体系统事件触发脉冲控制的研究背景和意义以及国内外研究现状。

第 2 章介绍了与本文研究工作相关的预备知识,并对文中出现的特殊符号作出说明。

第 3 章研究了基于静态事件触发机制的多智能体系统的一致性問題,通过利用克罗内克积性质构造统一的误差系统,给出并证明了受控多智能体系统实一致性需满足的充分性条件;同时,考虑了当脉冲控制受到拒绝服务攻击时,给出并证明了多智能体系统实一致性需满足的充分性条件。

第 4 章进一步研究了随机拒绝服务攻击下基于动态事件触发机制的多智能体系统的一致性問題,在相关假设条件下给出了被控多智能系统实现一致性需要满足的充分性条件。

第 5 章对全文的研究内容进行了总结与展望并说明了其存在的一些不足之处。

关键词: 多智能体系统, 一致性, 动态事件触发脉冲控制, 网络攻击

DYNAMIC EVENT-TRIGGERED IMPULSIVE CONTROL OF DISCRETE MULTI-AGENT SYSTEMS

ABSTRACT

Multi-agent systems refer to a distributed system composed of multiple agents through network interconnection, which has information analysis and processing capabilities that cannot be matched by a single agent, and is widely used in smart grid, aerospace, artificial intelligence. If the system contains a leader, it can be modeled as a leader-follower multi-agent systems. Under the action of control protocol, the follower agent will eventually emerge with the same dynamic behavior as the leader, and the controlled system is said to achieve leader-following consensus. In recent years, researchers have paid attention to static or dynamic event-triggered impulsive control strategies that integrate the advantages of impulsive control and event-triggered control. The mechanism can selectively trigger the controller according to the agent's state and act on the controlled target in a series of discrete moments. In fact, the communication network of multi-agent systems is also exposed to the threat of network attacks, such as denial-of-service attacks and spoofing attacks. In summary, this thesis studies the dynamic event-triggered impulsive control of leader-follower multi-agent systems with network attacks. The overall content arrangement is as follows:

In Chapter 1, we introduce the research background and significance of event-triggered control in multi-agent systems and summarize the research status of this field at home and abroad.

In Chapter 2, we introduce the prerequisites relevant to the research work in this thesis and explain the special symbols that appear in the text.

In Chapter 3, we study the consistency of multi-agent systems, and construct a unified error system by using the properties of Kronecker product, give and prove the sufficient conditions for the real consistency of the controlled multi-agent systems. At

the same time, the sufficient conditions for multi-agent systems consistency are given and proved when impulse control is attacked by denial-of-service.

In Chapter 4, we take a closer look at the consensus problem of multi-agent systems based on dynamic event-triggered mechanism under random denial-of-service attacks, and give the adequacy conditions that need to be met to achieve consensus in the controlled multi-agent systems under the relevant assumptions.

In Chapter 5, we systematically summarize the research work of this thesis and analyze its shortcomings, and look forward to the possible future research directions.

Zhang Dongyuan (Mathematics)

Supervised by Wu Xiaotai

KEY WORDS: multi-agent systems, consensus, dynamic event-triggered impulsive control, network attacks

目 录

摘 要	I
第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景与研究意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 论文内容安排.....	4
第 2 章 预备知识	5
2.1 基础理论与定义.....	5
2.2 符号说明.....	6
第 3 章 事件触发脉冲控制下多智能体系统的一致性	8
3.1 问题描述.....	8
3.2 一致性分析.....	10
3.3 数值模拟.....	12
3.4 本章小结.....	14
第 4 章 随机拒绝服务攻击下多智能体系统的动态事件触发脉冲控制	16
4.1 问题描述.....	16
4.2 主要结果.....	18
4.3 一致性分析.....	19
4.4 数值模拟.....	21
4.5 本章小结.....	24
第 5 章 总结与展望	25
参考文献	26
攻读硕士期间取得的学术成果	30
致谢	31

第1章 绪论

1.1 研究背景与研究意义

近年来,学者们对自然界生物群集现象进行了深入研究,在大量分析观测数据的基础上得出一些重要结论。研究发现,个体在群体中的能力是有限的,但是可以通过个体之间的协作交流来实现一些单一个体无法完成的复杂行为。例如,保持队形、躲避天敌、协同攻击、寻找食物等。在生物群集现象的启发下,研究者们提出了个体之间互相连通,协作执行任务或完成特定目标的多智能体系统数学模型。截至目前,多智能体系统因其良好的自主性、协调性、自组织性特点被越来越多的研究者所青睐,相关研究结果被广泛应用于社会科学和工程制造等领域^[1-3]。其中,一致性是多智能体系统协同控制领域的热点课题,如平均一致性^[4]、领导-跟随一致性^[5]、比例一致性^[6]等。所谓一致性是指针对每个智能体设计合适的控制协议,通过智能体间的信息交互来保证系统中所有个体在控制协议作用下最终趋向于一个共同状态。该研究的关键环节在于如何设计合适的控制协议。同时,多智能体系统在实际运行中往往会受到来自系统内部或外界的不利干扰,以至于全部的智能体会很难收敛到相同的状态。因此,在不理想的控制环境基础上设计恰当的控制协议将具有一定的现实意义。如果多智能体系统包含一个或多个领导者且其余智能体为跟随者,则该系统被称为领导-跟随多智能体系统,此类系统在实际应用中较为常见。研究该类系统中个体之间相互协作或合作竞争模式下的一致性问题的研究意义。

目前,针对多智能体系统的协同控制研究大多基于时间触发机制^[7-9],即经过相同的时间周期执行系统的采样和控制操作。通常,研究者们会设置一个较小的采样周期,使得系统在绝大部分情况下能够正常运行。尽管该举措确保了受控系统的稳定性,但是这种饱和式的触发机制会大量浪费有限的控制资源。而事件触发机制的依赖事件触发特性有效避免了上述问题,即只有在系统状态达到设定的触发条件时,在系统当中的各种传感器才会开始进行采样、传输数据以及更新控制信号等操作。因此,相对于时间触发机制,事件触发机制可以达到高效节省通信资源的目的。Tabuada^[9]首次引入事件触发机制来解决控制系统的能耗问题。

Dimarogonas 等^[10]将事件触发机制利用到多智能体系统平均一致性研究中,为后续事件触发机制在多智能体系统一致性问题中的广泛应用奠定了理论基础。此外,脉冲控制是另一种能有效节约资源的控制策略,其具有高效、灵活、低成本等诸多优良特性,被广泛应用于航天控制、药物治疗和机械系统等领域^[11-13]。Brentair 等^[11]采用脉冲控制方法研究了椭圆轨道上两颗卫星的交会问题,Hernandez 等^[12]建立了一类基于有界输入脉冲的治疗调度框架,该框架适用于多种疾病(如糖尿病、癌症和传染病)的治疗方法研究。

在实际应用中,常常需要考虑通信网络的拒绝服务等网络攻击可能导致系统的状态反馈或控制信号在传输过程中出现丢包现象^[14-16]。例如,Zhao 等^[15]使用 Lyapunov 稳定性理论研究了数据丢包情形下奇异网络系统的脉冲控制问题;Guan 等^[16]在网络化控制系统研究中定义了 N 步数据丢失率的新概念,给出了一些带传播单元的网络系统实现渐近稳定需要满足的充要条件。

综上,本文将事件触发控制和脉冲控制相结合,设计了一类动态事件触发脉冲控制策略,通过构造误差系统并分析误差系统的稳定性给出多智能体系统实现一致性需要满足的充分性条件。在此基础上,进一步考虑了随机拒绝服务攻击对相关研究的影响,并给出攻击背景下受控系统的稳定性分析与控制策略,相关研究是对 Ai 等^[17]现有工作的持续深化与拓展。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 多智能体系统的一致性

一致性是多智能体系统研究领域的核心课题,相关研究成果比如渐近一致性、输出一致性、有界一致性等,都被广泛应用于智能交通系统、蜂群编队等领域。在一致性问题的研究中收敛速度是一项关键指标,它反映了系统何时能够实现一致性。近年来,不少文献研究了多智能体系统的有限时间一致性问题。在实际应用中,我们需要系统状态在短时间内达成一致,尤其是在一些高精度控制系统中,需要系统有较高的控制精度和较快的响应速度。因此,针对多智能体系统有限时间一致性的研究开始引起大量学者们的关注^[18-25]。Bhat 等^[19]利用 LaSalle 不变原理研究了二阶多智能体系统的快速收敛性。Xiao 等^[20]研究了外界干扰下二阶多智能体系统的有限时间包容控制。受状态的符号函数或滑模控制中的切换函数

[21-22]的影响, 有限时间一致性控制协议通常是不连续的。然而, 在现实情况中, 不连续的控制协议可能会引起系统状态抖振, 不利于多智能体系统的收敛。Chen 等^[24]和 Xiao 等^[25]针对此类问题分别提出了严格有限时间 Lyapunov 稳定性和有限时间齐次稳定性的连续控制策略, 极大程度地解决了系统状态抖振问题。Lin 和 Zheng^[26]则针对由连续时间子系统和离散时间子系统组成的切换多智能体系统, 采用切换控制方法控制各智能体最终趋于一致。其中, 每个智能体有两个相同的特殊子系统, 共享相同的切换信号。关于切换非线性系统的有限时间控制已有诸多研究成果^[27-28], 但这些成果不能直接应用于多智能体系统, 原因在于并不是每个智能体都能获得所有智能体的全部状态。

此外, 学者们还进一步研究了离散多智能体系统的有限时间一致性问题^[29-30]。关于有限时间一致性, 该系统的收敛时间一般由初始条件决定。从该角度出发, Polyakov^[31]研究了一类动态系统的固定时间稳定性。对于具有积分器型动态的多智能体系统, 现有文献给出了一些固定时间一致性算法^[32-33]。Feng 和 Hua^[34]考虑了非线性多智能体系统在平衡有向通信拓扑下的固定时间单领导和多领导的协调跟踪问题。

1.2.2 事件触发控制下多智能体系统的一致性

在实际应用中, 通信和控制资源通常是有限的。因此, 在控制协议中不仅要考虑控制的精准性, 同时也要考虑到实际资源的有限性。通过引入事件触发控制可以有效解决上述问题, 且事件触发控制下控制信号只在系统状态误差大于预先假定的阈值时更新。因此, 与时间触发控制相比可以显著降低控制信号的更新频率, 节约控制资源。Chen 和 Hao^[35]设计了一类事件触发控制策略来使得单智能体系统达到稳定。Qian 等^[36]提出了使一组单积分器系统实现平均一致性的分布式事件触发控制策略, 并把结论进一步推广到自触发控制机制中。Wang 等^[37]研究了固定拓扑无向图下具有外部扰动的线性多智能体的一致性问题, 为了降低连续监测的要求, 针对每个智能体提出了分布式事件触发和自触发两种自适应输出反馈控制策略。Fan 等^[38]首次利用事件触发通信策略研究了有向通信拓扑下具有未知控制方向的多智能体系统的分布式协同控制问题。此外, 还提出一种自触发算法, 在底层结合 nussbaum 型函数方法和内部模型原理, 实现控制方向未知时局部参考点的输出跟踪。Xing 等^[39]提出基于组合测量误差的控制方法, 并设计

了一种新的分布式事件触发控制器来减少相邻智能体之间的通信负荷。近些年,事件触发控制策略已扩展至线性多智能体系统的一致性的研究中^[40]。Cheng 和 Li^[41]给出了带领导者的多智能体系统分别在无向图和有向图下的保证有界跟踪误差的事件触发控制协议。在 Qian 等^[42]提出的控制策略中,每个智能体都需要知道拉普拉斯矩阵的次小特征值或最大特征值,从而设计事件触发控制协议。如果文献[40]中系统的通信拓扑图为有向图,则需要知道拉普拉斯矩阵特征值的最小正实部。所有特征值信息都是全局信息,即事件触发控制策略并不是完全分布式的。有研究者进一步提出了两类完全分布式的事件触发控制策略^[42-43],以保证均匀线性多智能体系统实现一致性。

1.3 论文内容安排

本文共分为五章:第1章为绪论部分,阐述了课题的研究背景和意义、国内外研究现状以及论文的内容结构安排;第2章为基础知识部分,介绍了开展本文研究工作需要用到的相关基础知识,为后续研究的展开提供理论基础;第3章研究了拒绝服务攻击下领导-跟随多智能体系统的一致性问题,通过设计事件触发协议生成一系列离散的脉冲控制时刻,利用克罗内克积性质构造统一的误差系统,基于随机分析技巧给出并证明了受控多智能体系统实一致性需满足的充分性条件,同时,考虑了当脉冲控制受到拒绝服务攻击时,给出并证明了多智能体系统实一致性需满足的充分性条件;第4章考虑到脉冲控制在实际应用中可能受到外界干扰,通过引入随机拒绝服务攻击来模拟这一可能情形,在给定假设条件下研究了基于动态事件触发机制的多智能体系统的一致性问题,最后,设计一个数值仿真案例,通过 Matlab 数值仿真来验证本文所得结果的有效性;第5章对全文内容进行总结,并对将来可能的研究方向进行展望。

第2章 预备知识

本章介绍了控制领域经典的李雅普诺夫稳定性理论, 以及与课题研究相关的关键概念及其定义, 最后对文中涉及的特殊符号进行说明。

2.1 基础理论与定义

2.1.1 关键概念及其定义

本文主要研究多智能体系统的一致性问题, 下面给出几种关键概念的定义。

(1) 渐近一致性

考虑如下多智能体系统:

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + Bg(x_i(t)), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2.1)$$

定义 2.1: 对于多智能体系统(2.1), 若有:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_m - x_n\| = 0, \quad m \in \mathcal{V}, n \in \mathcal{V}, \quad (2.2)$$

则称多智能体系统(2.3)可以实现渐近一致性。

(2) 输出一致性

定义 2.2: 对于多智能体系统(2.1), 若有:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|y_m - y_n\| = 0, \quad m \in \mathcal{V}, n \in \mathcal{V}, \quad (2.3)$$

则称多智能体系统(2.3)可以实现输出一致性。

(3) 有界一致性

定义 2.3: 若多智能体状态向量 $x(t) \triangleq [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ 在有限时间内收敛到状态 $x^* \in \mathbb{R}^n$, 且属于有界一致集:

$$\mathcal{D}_\varepsilon = \{x \in \mathbb{R}^n : \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (x_m(t) - x_n(t)) < \varepsilon, m, n \in \mathcal{V}\}, \quad (2.4)$$

则称多智能体系统(2.3)可以实现有界一致性。

(4) $\mathcal{K}_\infty$ 类函数

定义 2.4: 若函数 $\alpha: \mathbb{R}_0^+ \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ 是连续的, 严格递增的并且 $\alpha(0) = 0$, 则称函数 α 为 $\mathcal{K}$ 类函数, 此外, 如果 $t \rightarrow \infty$ 时函数 $\alpha \rightarrow \infty$, 则称 α 为 $\mathcal{K}_\infty$ 类函数。

(5) Lipschitz 连续

对于实数集的子函数 $f: D \subseteq R \rightarrow R$ ，如果存在常数 K 使得

$$|f(a) - f(b)| \leq K|a - b|, \quad \forall a, b \in D, \quad (2.5)$$

则称函数 f 是 Lipschitz 连续的，满足条件的最小常数 K 是 f 的 Lipschitz 常数。

(6) 图论

假设 N 个智能体的信息交互图 $\mathcal{G} = \{\mathcal{V}, \varepsilon, \mathcal{A}\}$ ，其中 $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示节点， $\varepsilon \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 表示边集， $\mathcal{A} = [a_{ij}]_{N \times N}$ 表示邻接矩阵，当且仅当 $(i, j) \in \varepsilon$ 时， $a_{ij} > 0$ ，否则 $a_{ij} = 0$ 。这里，假设 $a_{ij} = 1$ 和 $d_i = 1$ 分别表示智能体 i 接收邻居节点 j 和领导者发送的状态信息。否则，令 $a_{ij} = 0$ 和 $d_i = 0$ 。 $\hat{L}$ 为 $\mathcal{G}$ 的拉普拉斯矩阵，矩阵 $\hat{D} = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_N)$ ， I_N 和 I_{Nn} 分别为 N 维和 Nn 维的单位矩阵。 A 和 B 的克罗内克积被定义为

$$A \otimes B = \begin{pmatrix} a_{11}B & \cdots & a_{1m}B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}B & \cdots & a_{nm}B \end{pmatrix}.$$

2.2 符号说明

符号	符号解释
R	实数集
A	常数矩阵
N	非负自然数
R^n	n 维实向量空间
$E[\cdot]$	概率空间上的期望
$P[\cdot]$	为概率空间上的概率
$ \cdot $	欧几里得范数或 2-范数

t_k^+	t_k 的右极限
N_+	正整数
$N_d^{(i,j)}$	时间间隔 $(t_i, t_j]$ 内发生的拒绝服务攻击次数

第3章 事件触发脉冲控制下多智能体系统的一致性

本章研究了在静态事件触发脉冲控制下一类领导-跟随多智能体系统的一致性问题。在事件触发规则下，通过构造误差系统，获得了多智能体系统一致性的充分条件，并通过数值算例验证了所得结论的有效性。

3.1 问题描述

3.1.1 系统描述与定义

考虑如下具有 N 个跟随者的多智能体系统：

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + Bg(x_i(t)), i = 1, 2, \dots, N, \quad (3.1)$$

这里 $x_i(t) \in R^n$ 表示系统第 i 个节点的状态， A 和 B 为常数矩阵， $g(\cdot)$ 为非线性函数，其领导者的动力学方程为：

$$\dot{s}(t) = As(t) + Bg(s(t)). \quad (3.2)$$

针对系统(3.1)和(3.2)，为确保系统实现领导-跟随一致性，设计如下的脉冲控制器：

$$u_i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (\alpha \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) - \hat{\beta} d_i (x_i(t) - s(t)) \delta(t - t_k), \quad (3.3)$$

这里 $\{t_k\}_{k=1}^{\infty}$ 为待定的脉冲时刻序列， $u_i(t)$ 为脉冲控制输入，耦合强度 $\alpha, \hat{\beta} \in (0, 1)$ ， N_i 是智能体 i 的邻居节点 j 的集合， a_{ij} 为系统拓扑图对应的邻接矩阵的元素， $\delta(\cdot)$ 是 Dirac 函数。通常，令 $a_{ij} = 1$ 和 $d_i = 1$ 分别表示智能体 i 接收邻居节点 j 和领导者发送的状态信息。否则，令 $a_{ij} = 0$ 和 $d_i = 0$ 。

定义系统(3.1)和(3.2)的状态误差 $e_i(t) = x_i(t) - s(t)$ ，则由(3.1)与(3.2)式可以得到如下系统误差表达式

$$\begin{cases} \dot{e}_i(t) = Ae_i(t) + Bg(e_i(t)), t \neq t_k, \\ e_i(t) = \alpha \sum_{j \in N_i} a_{ij} (e_j(t^-) - e_i(t^-)) - \hat{\beta} d_i e_i(t^-) + e_i(t^-), t = t_k, \end{cases} \quad (3.4)$$

这里 $g(e_i(t), s(t)) = g(x_i(t)) - g(s(t))$ ，且系统误差(3.4)在任意脉冲时刻右连续。

3.1.2 控制模型

考虑拒绝服务攻击对脉冲控制的影响, 结合克罗内克积性质, 系统(3.4)可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = (I_N \otimes A)e(t) + (I_N \otimes B)G(e(t)), t \neq t_k, \\ e(t_k) = \begin{cases} e(t_k^-), & t_k = t_{Dos}, \\ h(e(t_k^-)), & t_k \neq t_{Dos}, \end{cases} \end{cases} \quad (3.5)$$

这里 $t_k = t_{Dos}$ 表示拒绝服务攻击发生在 t_k 时刻, $t_k \neq t_{Dos}$ 表示 t_k 时刻没有发生拒绝服务攻击, $G(e(t)) = [G(e_1(t))^T, G(e_2(t))^T, \dots, G(e_N(t))^T]^T$, $h(e(t_k^-)) = ((-\alpha \hat{L} - \hat{\beta} \hat{D}) \otimes I_n + I_{Nn})e(t_k^-)$ 。 $\hat{L}$ 为系统(3.4)拓扑图的拉普拉斯矩阵, 矩阵 $\hat{D} = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_N)$, I_N 和 I_{Nn} 分别为 N 维和 Nn 维的单位矩阵, $e(t_k) = e(t_k^+) = \lim_{h \rightarrow 0^+} e(t_k + h)$ 。

定义 3.1: 对于任意的 $e(t_k) \in R^n$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时有 $e(t_k) = 0$, 则称多智能体系统(3.1)和(3.2)可以实现一致性。

由定义 3.1 知要研究多智能系统(3.1)与(3.2)的一致性, 只需要分析误差系统(3.4)的稳定性。在证明误差系统 (3.4)的稳定性前, 先给出以下两个假设条件:

假设 3.1: 假定存在一个正常数 $\mu < 1$, 使得 $|h(e(t_k))| \leq \mu |e(t_k)|$ 。

假设 3.2: 假定存在正常数 L , 使得

$$D^+ |e(t)| = \limsup_{h \rightarrow 0^+} \frac{|e(t) + h((I_N \otimes A)e(t) + (I_N \otimes B)G(e(t)))| - |e(t)|}{h} \leq L |e(t)|,$$

这里 $D^+ |e(t)|$ 表示 $|e(t)|$ 沿系统(3.4)的右上 Dini 导数。

3.1.3 事件触发脉冲控制方法

下面, 将设计一类事件触发脉冲控制以保证误差系统(3.4)的稳定性。假定脉冲事件触发规则如下:

$$\begin{cases} \bar{t}_k = \inf \{t \geq t_{k-1} + \Delta \mid \beta |e(t_{k-1})| - |e(t_k^-)| \leq 0\}, \\ t_k = \max \{\bar{t}_k, \tau_k\}, \quad k \in N_+, \\ e(t_k) = \begin{cases} e(t_k^-), & t_k \neq t_{Dos}, \\ h(e(t_k^-)), & t_k \neq t_{Dos}, \end{cases} \end{cases} \quad (3.6)$$

这里参数 $\Delta > 0$, $\beta > 1$, 离散时间序列 $\{\tau_k\}_{k=1}^{\infty}$ 满足条件 $\tau_k - \tau_{k-1} \geq \Delta$ 、 $\tau_0 = 0$, 当 $k \rightarrow \infty$ 时, $\tau_k \rightarrow \infty$ 。由设定的事件触发条件决定更新时刻, 相邻采样间隔通过零阶保持器保持信号值不变。

注 3.1: 在脉冲事件触发协议(3.6)中引入了时间区间参数 Δ , 其可以有效避免系统在脉冲事件触发控制过程中发生 Zeno 行为。

3.2 一致性分析

下面将分析多智能体系统(3.1)与(3.2)在脉冲控制下实现一致性的充分条件, 即需要分析误差系统(3.4)稳定的充分条件。

3.3.1 无拒绝服务攻击背景下的脉冲控制

定理 3.1: 若假设 3.1 与 3.2 成立, 且满足 $\mu\beta < 1$, $0 < \Delta \leq \frac{\ln \beta}{L}$, 则多智能体系统(3.1)与(3.2)满足一致性。

证明: 当 $t \in [t_{k-1}, t_{k-1} + \Delta)$ 时, 根据假设 3.2 可以得到

$$|e(t)| \leq e^{L(t-t_{k-1})} |e(t_{k-1})|, \quad (3.7)$$

结合 $0 < \Delta \leq \frac{\ln \beta}{L}$, 则有

$$|e(t)| \leq e^{L\Delta} |e(t_{k-1})| \leq \beta |e(t_{k-1})|. \quad (3.8)$$

当 $t \in [t_{k-1} + \Delta, t_k)$ 时, 由事件触发协议(3.6)可得

$$\beta |e(t_{k-1})| - |e(t)| \geq 0, \quad (3.9)$$

由(3.9)式不难得到

$$|e(t)| \leq \beta |e(t_{k-1})|. \quad (3.10)$$

结合(3.8)、(3.10)式, 当 $t \in [t_{k-1}, t_k)$ 时有

$$|e(t)| \leq \beta |e(t_{k-1})|, k \in N_+. \quad (3.11)$$

由假设 3.1 可得

$$|e(t)| \leq \mu |e(t_{k-1}^+)| \quad t \in (t_{k-1}, t_k], k \in N_+, \quad (3.12)$$

则由(3.12)式可得

$$|e(t_k)| \leq a_0 |e(t_{k-1})|, \quad (3.13)$$

这里 $a_0 = \mu\beta$ 。

利用迭代法

$$\begin{aligned}
 |e(t_k)| &\leq a_0 |e(t_{k-1})| \\
 &\leq a_0^2 |e(t_{k-2})| \\
 &\leq a_0^3 |e(t_{k-3})| \\
 &\leq \dots \\
 &\leq a_0^k |e(t_0)| \quad \forall k \in N_+,
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

根据给定条件 $a_0 = \mu\beta < 1$ ，当 $k \rightarrow \infty$ 时 $a_0^k \rightarrow 0$ ，则 $a_0^k |e(t_0)| \rightarrow 0$ ，故有 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t_k)| = 0$ 。综上，基于假设 3.1 和 3.2，领导-跟随多智能系统(3.1)与(3.2)满足一致性。证明完毕。

3.3.2 拒绝服务攻击下系统的脉冲控制

本节将分析多智能体系统在拒绝服务攻击下的一致性。令 $N_d^{(i,j)}$ 表示在时间间隔 $(t_i, t_j]$ 内发生的拒绝服务攻击次数。

假设 3.3: 存在实数 $N_0 \geq 0$ 和实数 $T \geq 1$ ，使得

$$N_d^{(i,j)} \leq N_0 + \frac{j-i}{T}, \tag{3.15}$$

这里 N_0 为弹性系数， $\frac{1}{T}$ 为攻击频率。

定理 3.2: 若假设 3.1-3.3 成立，且满足 $\mu^{\frac{1}{T}} \beta < 1$ ， $0 < \Delta \leq \frac{\ln \beta}{L}$ ，则领导-跟随多智能体系统(3.1)和(3.2)在脉冲事件触发控制下实现一致性。

证明: 由(3.13)可得

$$|e(t_k^+)| \leq \begin{cases} a_0 |e(t_{k-1}^+)|, & t_k \neq t_{Dos}, \\ a_1 |e(t_{k-1}^+)|, & t_k = t_{Dos}, \end{cases} \tag{3.16}$$

这里 $a_0 = \mu\beta$ ， $a_1 = \beta$ 。通过迭代，对于 $\forall k \in N_+$ ，可得

$$|e(t_k)| \leq a_0^{k-N_d^{(0,k)}} a_1^{N_d^{(0,k)}} |e(t_0)| \leq \mu^{k-N_d^{(0,k)}} \beta^k |e(t_0)|. \tag{3.17}$$

由假设 3.3 的条件，对于 $\forall k \in N_+$ ，

$$|e(t_k)| \leq \mu^{k-(N_0+\frac{k}{T})} \beta^k |e(t_0)| \leq \mu^{-N_0} (\mu^{\frac{1}{T}} \beta)^k |e(t_0)| \tag{3.18}$$

根据 $\mu^{1-\frac{1}{T}}\beta < 1$, 可得当 $k \rightarrow \infty$ 时, $(\mu^{1-\frac{1}{T}}\beta)^k \rightarrow 0$, 故有 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t_k)| = 0$ 。综上, 基于假设 3.1-3.3, 领导-跟随多智能系统(3.1)与(3.2)满足一致性。证明完毕。

注 3.2: 当 $T \rightarrow \infty$ 且 $N_0 = 0$ 时, 即事件触发脉冲控制方法中不发生拒绝服务攻击时, 定理 3.2 的条件将退化为定理 3.1 的条件, 此时定理 3.1 是定理 3.2 的特例。

3.3 数值模拟

在本小节中, 将通过设计一个数值仿真案例来验证本章所得结果的有效性。考虑包含 1 个领导者和 4 个跟随者的多智能体系统, 其系统拓扑图参见图 3.1。

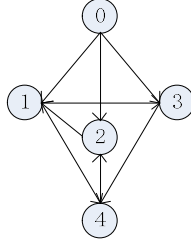


图 3.1 多智能体系统的有向拓扑图

由图 3.1 可知, 系统拓扑图对应的拉普拉斯矩阵 $\hat{L}$ 和连接矩阵 $\hat{D}$ 分别为:

$$\hat{L} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}, \quad \hat{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

不妨以 Chua 系统单元动态方程作为所有智能体的动力学方程, 基于静态事件触发脉冲控制策略, 研究拒绝服务攻击下该系统的一致性。考虑 Chua 系统单元动态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_{i1}(t) = -p_1 x_{i1}(t) + p_1 x_{i2}(t) - p_1 G(x_{i1}(t)), \\ \dot{x}_{i2}(t) = x_{i1}(t) - x_{i2}(t) + x_{i3}(t), \\ \dot{x}_{i3}(t) = -p_1 x_{i2}(t), \end{cases} \quad (3.19)$$

这里 $G(x_{i1}(t)) = m_2 x_{i1}(t) + 0.5(m_1 - m_2)(|x_{i1}(t) + 1| - |x_{i1}(t) - 1|)$, $m_1 < m_2 < 0$ 是已知常数。

由(3.1)式和系统(3.19)可知:

$$\text{矩阵 } A = \begin{bmatrix} -2.229 & 9.21 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & -15.995 & 0 \end{bmatrix}, \text{ 矩阵 } B = I_3, G(e_i(t)) = \begin{bmatrix} 2.26566(|x_{i1}(t)+1|-|x_{i1}(t)-1|) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}。$$

此外, 当 $p_1=9.21$, $p_2=15.995$, $m_1=-1.25$, $m_2=-0.758$ 时, 系统(3.19)将成为一个混沌系统, 其状态轨迹如图 3.2 所示。

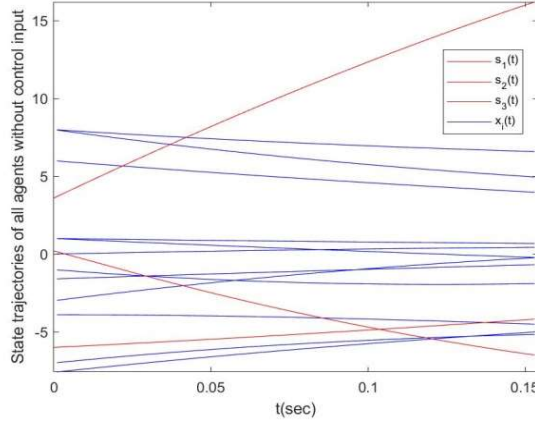


图 3.2 无控制输入下系统的状态轨迹

在初始时刻 $t=t_0$, 选取各智能体的状态为:

$x_1(t_0) = [-7 \ 1 \ 6]^T$, $x_2(t_0) = [8 \ -1 \ -3]^T$, $x_3(t_0) = [8 \ 0 \ -3]^T$, $x_4(t_0) = [-7 \ 1 \ -1]^T$,
 $s(t_0) = [0.2 \ -6 \ 3]^T$ 。不妨取耦合强度 $\alpha=0.3$, $\hat{\beta}=0.3$ 。方便起见, 取 $\Delta=0.001$,
 $T_1=0.02$, $T_2=0.03$, $T_3=0.04$, $\beta=1.2$ 。在拒绝服务攻击下, 可以得到一个由
 静态事件触发协议(3.6)生成的有效脉冲时间序列, 且其脉冲间距如图 3.3 所示。

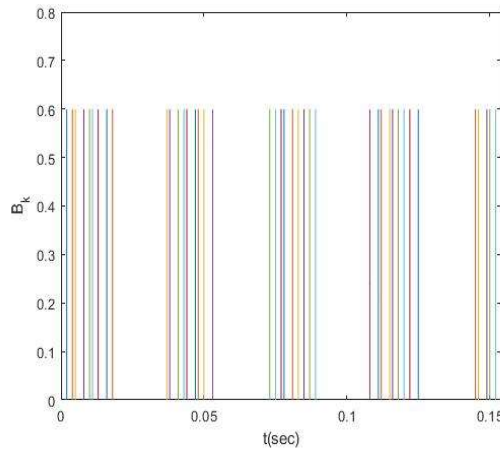


图 3.3 相邻有效脉冲时刻的脉冲间距

在脉冲控制器的作用下，最终得到如图 3.4 和图 3.5 所示的 4 个跟随者智能体的系统状态轨迹。

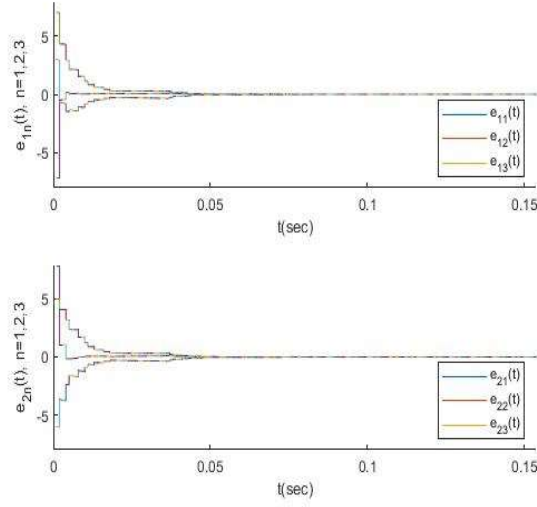


图 3.4 脉冲控制下智能体 1 和 2 的误差状态轨迹

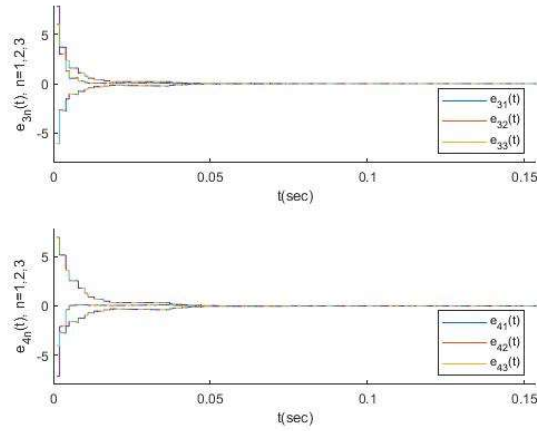


图 3.5 脉冲控制下智能体 3 和 4 的误差状态轨迹

由图 3.4 和图 3.5 可以看出，在受到拒绝服务攻击影响的有效脉冲控制协议作用下，4 个跟随者智能体和领导者之间的误差状态轨迹呈收敛趋势，且最终接近于 0。换言之，被控多智能体系统(3.19)可以实现一致性。

3.4 本章小结

本章研究了一类领导-跟随多智能体系统的静态事件触发脉冲控制问题。通过设计事件触发协议生成一系列离散的脉冲控制时刻，利用克罗内克积性质构造

统一的误差系统,给出并证明了受控多智能体系统实现一致性需满足的充分性条件;同时,考虑了当脉冲控制受到拒绝服务攻击时,给出并证明了多智能体系统实一致性需满足的充分性条件。最后,设计了一个数值仿真案例,通过 Matlab 数值仿真来验证本章所得结果的有效性。

第 4 章 随机拒绝服务攻击下多智能体系统的动态事件触发脉冲控制

本章将在第 3 章的基础上, 考虑引入随机拒绝服务攻击, 基于动态事件触发脉冲控制策略, 研究被控多智能体系统的一致性问题。

4.1 问题描述

4.1.1 系统描述与定义

考虑如下具有 N 个跟随者的多智能体系统:

$$\dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + Bg(x_i(t)), i = 1, 2, \dots, N, \quad (4.1)$$

这里 $x_i(t) \in R^n$ 表示系统第 i 个节点的状态, A 和 B 为常数矩阵, $g(\cdot)$ 为非线性函数, 其领导者的动力学方程为:

$$\dot{s}(t) = As(t) + Bg(s(t)). \quad (4.2)$$

为确保系统实现领导-跟随多智能体系统一致性, 针对系统(4.1)和(4.2)设计如下的脉冲控制器:

$$u_i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (\alpha \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) - \hat{\beta} d_i (x_i(t) - s(t)) \delta(t - t_k)), \quad (4.3)$$

这里 $\{t_k\}_{k=1}^{\infty}$ 为待定的脉冲时刻序列, $u_i(t)$ 为脉冲控制输入, 耦合强度 $\alpha, \hat{\beta} \in (0, 1)$, N_i 是智能体 i 的邻居节点 j 的集合, a_{ij} 为系统拓扑图对应的邻接矩阵的元素, $\delta(\cdot)$ 是 Dirac 函数。通常, 令 $a_{ij} = 1$ 和 $d_i = 1$ 分别表示智能体 i 接收邻居节点 j 和领导者发送的状态信息。反之, 则令 $a_{ij} = 0$ 和 $d_i = 0$ 。

定义误差向量 $e_i(t) = x_i(t) - s(t)$ 。于是系统(4.1)与(4.2)可以转化为如下误差系统:

$$\begin{cases} \dot{e}_i(t) = Ae_i(t) + Bg(e_i(t)), t \neq t_k, \\ e_i(t) = \alpha \sum_{j \in N_i} a_{ij} (e_j(t^-) - e_i(t^-)) - \hat{\beta} d_i e_i(t^-) + e_i(t^-), t = t_k, \end{cases} \quad (4.4)$$

这里 $g(e_i(t)) = g(x_i(t)) - g(s(t))$, 假定系统(4.4)在脉冲时刻右连续。

4.1.2 控制模型

考虑随机拒绝服务攻击对脉冲控制的影响, 结合克罗内克积性质将系统(4.4)可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = (I_N \otimes A)e(t) + (I_N \otimes B)G(e(t)), t \neq t_k, \\ e(t_k) = \begin{cases} e(t_k^-), & t_k = t_{Dos}, \\ h(e(t_k^-)), & t_k \neq t_{Dos}, \end{cases} \end{cases} \quad (4.5)$$

这里 $t_k = t_{Dos}$ 表示拒绝服务攻击发生在 t_k 时刻, $t_k \neq t_{Dos}$ 表示 t_k 时刻没有发生拒绝服务攻击, $G(e(t)) = [G(e_1(t))^T, G(e_2(t))^T, \dots, G(e_N(t))^T]^T$, $h(e(t_k^-)) = ((-\alpha\hat{L} - \hat{\beta}\hat{D}) \otimes I_n + I_{Nn})e(t_k^-)$, $t_k \neq t_{Dos}$ 表示 t_k 时刻没有发生拒绝服务攻击, $t_k = t_{Dos}$ 表示 t_k 时刻发生拒绝服务攻击, $\hat{L}$ 为系统(4.4)拓扑图的拉普拉斯矩阵, $\hat{D} = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_N)$, I_N 和 I_{Nn} 分别为 N 维和 Nn 维的单位矩阵, $e(t_k) = e(t_k^+) = \lim_{h \rightarrow 0^+} e(t_k + h)$ 。

定义 4.1: 对于任意的 $e(t_k) \in R^n$, 若当 $t \rightarrow \infty$ 时存在 $e(t_k) = 0$, 则称多智能体系统可以实现一致性。

由定义 4.1 知要研究多智能系统(4.1)与(4.2)的一致性, 只需要分析系统(4.4)的稳定性。在证明系统(4.4)的稳定性前, 需要以下两个假设条件:

假设 4.1: 假定存在一个正常数 $\mu < 1$, 使得 $|h(e(t_k))| \leq \mu |e(t_k)|$ 。

假设 4.2: 假定存在正常数 L , 使得

$$D^+ |e(t)| = \limsup_{h \rightarrow 0^+} \frac{|e(t) + h((I_N \otimes A)e(t) + (I_N \otimes B)G(e(t)))| - |e(t)|}{h} \leq L |e(t)|,$$

这里 $D^+ |e(t)|$ 表示 $|e(t)|$ 沿系统(4.4)的右上 Dini 导数。

4.1.3 动态事件触发脉冲控制方法

本章将采用动态事件触发脉冲控制方法来研究误差系统(4.4)的稳定性, 现设计一类动态事件触发规则:

$$\begin{cases} \bar{t}_k = \inf \{t \geq t_{k-1} + \Delta \mid \eta(t) + \sigma [\beta |e(t_{k-1})| - |e(t_k^-)|] \leq 0\}, \\ t_k = \max \{\bar{t}_k, \tau_k\}, \quad k \in N_+, \\ e(t_k) = \begin{cases} e(t_k^-), & t_k = t_{Dos}, \\ h(e(t_k^-)), & t_k \neq t_{Dos}, \end{cases} \end{cases} \quad (4.6)$$

这里 $\Delta > 0, 0 < \sigma < 1, \beta > 1, \{\tau_k\}_{k=1}^\infty$ 是脉冲时间序列且 $\tau_k - \tau_{k-1} \geq \Delta, \tau_0 = 0$, 当 $k \rightarrow \infty$ 时, $\tau_k \rightarrow \infty$ 。且动态变量 $\eta(t)$ 满足

$$\begin{cases} \dot{\eta}(t) = \begin{cases} 0, & t \in [t_{k-1}, t_{k-1} + \Delta), \\ -\gamma(\eta(t)) + \beta |e(t_{k-1})| - |e(t_k^-)|, & t \in [t_{k-1} + \Delta, t_k), \end{cases} \\ \eta(t_k) = \min \{\rho \eta(t_{k-1}), \eta(t_k^-)\}, \quad k \in N_+, \\ \eta(t_0) = \eta_0 \geq 0, \end{cases} \quad (4.7)$$

这里 γ 是一个局部 Lipschitz 连续的 $\mathcal{K}_\infty$ 类函数, 正常数 $\rho < 1$, 假设 $\eta(t)$ 在 t_k 右连续。

注 4.1: 在(4.6)式中脉冲触发区间具有下界 Δ , 且 $\Delta > 0$, 故可以有效避免 Zeno 行为。

4.2 主要结果

引理 4.1: 若 $\eta(t_0) = \eta_0 \geq 0$, 当 $\rho > 0$ 且 γ 为 $\mathcal{K}_\infty$ 函数时, 动态变量 $\eta(t) \geq 0$ 。

证明: 当 $t \in [t_0, t_0 + \Delta)$ 由(3.7)式可得

$$\dot{\eta}(t) = 0, \quad t \in [t_0, t_0 + \Delta), \quad (4.8)$$

由 $\eta(t_0) = \eta_0 \geq 0$, 不难得到

$$\eta(t) = 0, \quad t \in [t_0, t_0 + \Delta). \quad (4.9)$$

由事件触发协议(4.6)可得

$$\beta |e(t_k)| - |e(t_{k-1}^-)| \geq -\frac{\eta(t)}{\sigma}, \quad t \in [t_0 + \Delta, t_1), \quad (4.10)$$

结合(4.7)和(4.10)式可到

$$\dot{\eta}(t) \geq -\gamma(\eta(t)) - \frac{\eta(t)}{\sigma}, \quad t \in [t_0 + \Delta, t_1), \quad (4.11)$$

注意到 γ 为 $\mathcal{K}_\infty$ 类函数, 由(4.11)式知,

$$\text{当 } \eta(t) = 0 \text{ 时, 有 } \dot{\eta}(t) > 0, t \in [t_0 + \Delta, t_1), \quad (4.12)$$

则由(4.12)式可得

$$\eta(t) \geq 0, t \in [t_0, t_1). \quad (4.13)$$

由(4.7)式可得

$$\eta(t_k) = \min \{ \rho \eta(t_{k-1}), \eta(t_k^-) \}. \quad (4.14)$$

由(4.13)与(4.14)式, 易知, 对 $\forall k$ 有

$$\eta(t) \geq 0, t \in [t_{k-1}, t_k), \quad (4.15)$$

证明完毕

4.3 一致性分析

下面将考虑系统遭受随机拒绝服务攻击时, 给出多智能体系统(4.1)与(4.2)在脉冲控制作用下实现均值意义下的一致性需要满足的充分性条件。

假设 4.3: 对任意的 $\hat{j} \geq \hat{i}$, $\hat{i}, \hat{j} \in N$, 如果存在弹性系数 $N_0 \geq 0$ 使得

$$N_t^{(\hat{i}, \hat{j})} \leq N_0 + \frac{\hat{j} - \hat{i}}{T}, \quad (4.16)$$

这里 T 为随机变量取值于集合 $S = \{T_1, T_2, \dots, T_r, \dots, T_h\}$, 且满足条件

$P(T = T_r) = p_r$ 和 $\sum_{r=1}^h p_r = 1$, $N_t^{(\hat{i}, \hat{j})}$ 表示时间区间 $[t_i, t_j)$ 内随机拒绝服务攻击发生的

次数。

定理 4.1: 若假设 4.1-4.3 成立, 且存在参数 μ, β, L 使得 $\mu\beta < 1$, $E\left(\mu^{\frac{1}{T}}\beta\right) < 1$,

$0 < \Delta \leq \frac{\ln \beta}{L}$, 则称多智能体系统(4.1)与(4.2)可以在动态事件触发协议(4.6)与(4.7)

作用下实现均值意义下的一致性。

证明: 当 $t \in [t_{k-1}, t_{k-1} + \Delta)$ 时, 根据假设 4.2 可以得到

$$|e(t)| \leq e^{L(t-t_{k-1})} |e(t_{k-1})|, \quad (4.17)$$

结合 $0 < \Delta \leq \frac{\ln \beta}{L}$, 则有

$$|e(t)| \leq e^{L\Delta} |e(t_{k-1})| \leq \beta |e(t_{k-1})|. \quad (4.18)$$

当 $t \in [t_{k-1} + \Delta, t_k)$ 时, 由事件触发协议(4.6)可得

$$\eta(t) + \sigma [\beta |e(t_{k-1}) - e(t)|] \geq 0, \quad (4.19)$$

则由(4.19)式不难得到

$$|e(t)| \leq \beta |e(t_{k-1})| + \frac{\eta(t)}{\sigma}. \quad (4.20)$$

结合(4.18)、(4.20)式, 当 $t \in [t_{k-1}, t_k)$ 时可得

$$|e(t)| \leq \beta |e(t_{k-1})| + \frac{\eta(t)}{\sigma}, k \in N_+. \quad (4.21)$$

由假设 4.1 可得

$$|e(t)| \leq \mu |e(t_{k-1})|, t \in (t_{k-1}, t_k], k \in N_+, \quad (4.22)$$

则由(4.22)式可得

$$|e(t_k)| \leq a_0 |e(t_{k-1})| + b_k, \quad (4.23)$$

这里 $a_0 = \mu\beta$, $b_k = \frac{\mu}{\sigma} \eta(t_k)$ 。

由(4.6)与(4.23)式可得

$$|e(t_k)| \leq \begin{cases} a_0 |e(t_{k-1})| + b_k, & t_k \neq t_{Dos}, \\ a_1 |e(t_{k-1})| + b_k, & t_k = t_{Dos}, \end{cases} \quad (4.24)$$

这里 $a_0 = \mu\beta$, $a_1 = \beta$ 。对于 $\forall k \in N_+$, 通过迭代可得

$$\begin{aligned} |e(t_k)| &\leq a_0^{k-N_t^{(0,k)}} a_1^{N_t^{(0,k)}} |e(t_0)| + \sum_{\tilde{i}=1}^k a_0^{k-\tilde{i}-N_t^{(0,k)}} a_1^{N_t^{(0,k)}} b_{\tilde{i}} \\ &\leq \mu^{k-N_t^{(0,k)}} \beta^k |e(t_0)| + \sum_{\tilde{i}=1}^k \mu^{k-\tilde{i}-N_t^{(0,k)}} \beta^{k-\tilde{i}} b_{\tilde{i}}. \end{aligned} \quad (4.25)$$

对于 $\forall k \in N_+$, 基于假设 4.3 可得

$$|e(t_k)| \leq \mu^{k-(N_0+\frac{k}{T})} \beta^k |e(t_0)| + \sum_{\tilde{i}=1}^k \mu^{k-\tilde{i}-(N_0+\frac{k}{T})} \beta^{k-\tilde{i}} b_{\tilde{i}}. \quad (4.26)$$

显然, 由(4.26)式不难得到

$$E(|e(t_k)|) \leq \mu^{-N_0} [(E(\mu^{1-\frac{1}{T}} \beta))^k |e(t_0)| + \sum_{\tilde{i}=1}^k (E(\mu^{1-\frac{1}{T}} \beta))^{k-\tilde{i}} b_{\tilde{i}}]. \quad (4.27)$$

由于 $E(\mu^{1-\frac{1}{T}}\beta) < 1$, 有 $\lim_{k \rightarrow \infty} E(\mu^{1-\frac{1}{T}}\beta)^k = 0$ 。

接下来, 将 $\sum_{\tilde{i}=1}^k (E(\mu^{1-\frac{1}{T}}\beta))^{k-\tilde{i}} b_{\tilde{i}}$ 代入公式 $b_k = \frac{\mu}{\sigma} \eta(t_k^-) \leq M \eta(t_k) \leq M \rho^k \eta_0$ 中, 不难得到 $\sum_{\tilde{i}=1}^k (E(\mu^{1-\frac{1}{T}}\beta))^{k-\tilde{i}} b_{\tilde{i}} \leq M \eta_0 \sum_{\tilde{i}=1}^k \rho^{\tilde{i}} \leq M \eta_0 k \rho^k$, 这里 M 为有界正常数且 $c = \max \left\{ E(\mu^{1-\frac{1}{T}}\beta), \rho \right\} < 1$ 。当 $k \rightarrow \infty$ 时, 有 $\sum_{\tilde{i}=1}^k (E(\mu^{1-\frac{1}{T}}\beta))^{k-\tilde{i}} b_{\tilde{i}} \rightarrow 0$, 则由(4.27)式可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} E(|e(t_k)|) = 0$ 。综上, 基于假设 4.1-4.3, 领导-跟随多智能系统(4.1)与(4.2)可以在动态事件触发协议(4.6)与(4.7)作用下实现均值意义下的一致性。证明完毕。

4.4 数值模拟

在本小节中, 将通过设计一个数值仿真案例来验证本文所得结果的有效性。考虑包含 1 个领导者和 4 个跟随者的多智能体系统, 其系统拓扑图参见图 4.1。

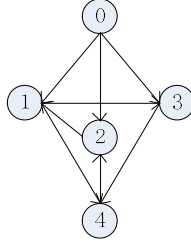


图 4.1 多智能体系统的有向拓扑图

由图 4.1 可知, 系统拓扑图对应的拉普拉斯矩阵 $\hat{L}$ 和连接矩阵 $\hat{D}$ 分别为:

$$\hat{L} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}, \quad \hat{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

不妨以 Chua 系统单元动态方程作为所有智能体的动力学方程, 基于动态事件触发脉冲控制策略, 研究随机拒绝服务攻击下该系统在均值意义下的一致性问题。考虑 Chua 系统单元动态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_{i1}(t) = -p_1 x_{i1}(t) + p_1 x_{i2}(t) - p_1 G(x_{i1}(t)), \\ \dot{x}_{i2}(t) = x_{i1}(t) - x_{i2}(t) + x_{i3}(t), \\ \dot{x}_{i3}(t) = -p_1 x_{i2}(t), \end{cases} \quad (4.28)$$

这里 $G(x_{i1}(t)) = m_2 x_{i1}(t) + 0.5(m_1 - m_2)(|x_{i1}(t) + 1| - |x_{i1}(t) - 1|)$, $m_1 < m_2 < 0$ 是已知常数。

由(4.1)式和系统(4.28)可知:

$$\text{矩阵 } A = \begin{bmatrix} -2.229 & 9.21 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & -15.995 & 0 \end{bmatrix}, \text{ 矩阵 } B = I_3, G(e_i(t)) = \begin{bmatrix} 2.26566(|x_{i1}(t) + 1| - |x_{i1}(t) - 1|) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}。$$

此外, 当 $p_1 = 9.21$, $p_2 = 15.995$, $m_1 = -1.25$, $m_2 = -0.758$ 时, 系统(4.28)将成为一个混沌系统, 其状态轨迹如图 4.2 所示。

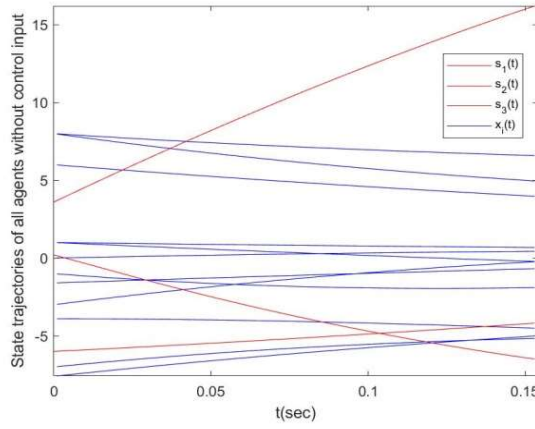


图 4.2 无控制输入下系统的状态轨迹

在初始时刻 $t = t_0$, 选取各智能体的状态为:

$x_1(t_0) = [-7.6 \ 1 \ 6]^T$, $x_2(t_0) = [8 \ -1.6 \ -3]^T$, $x_3(t_0) = [8 \ 0 \ -3.9]^T$,
 $x_4(t_0) = [-7 \ 1 \ -1]^T$, $s(t_0) = [0.2 \ -0.6 \ 3.6]^T$ 。不妨取耦合强度 $\alpha = 0.2$, $\hat{\beta} = 0.2$,
 则计算可得 $\mu = 0.74$ 。方便起见, 取 $\Delta = 0.001$, $\sigma = 2$, $T_1 = 0.02$, $T_2 = 0.03$, $T_3 = 0.04$,
 $\beta = 1.2$ 。在随机拒绝服务攻击下, 可以得到一个由动态事件触发协议(4.6)和(4.7)
 生成的有效脉冲时间序列, 且其脉冲间距如图 4.3 所示。

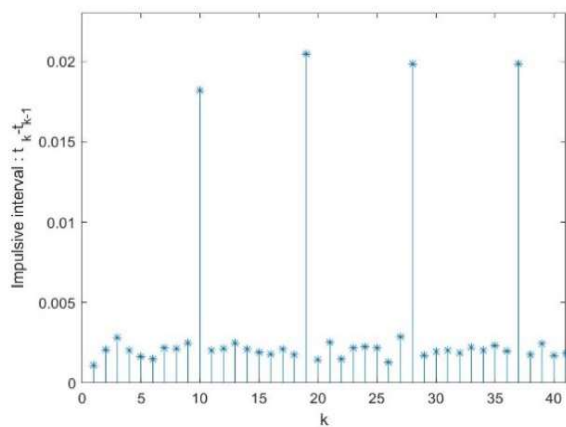


图 4.3 相邻有效脉冲时刻的脉冲间距

在脉冲控制器的作用下，最终得到如图 4.4 和图 4.5 所示的 4 个跟随者智能体的系统状态轨迹。

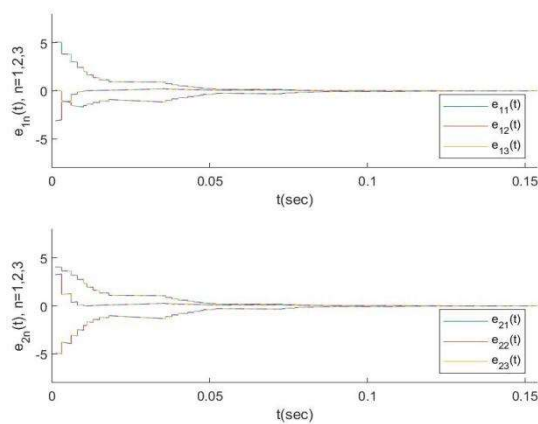


图 4.4 脉冲控制下智能体 1 和 2 的误差状态轨迹

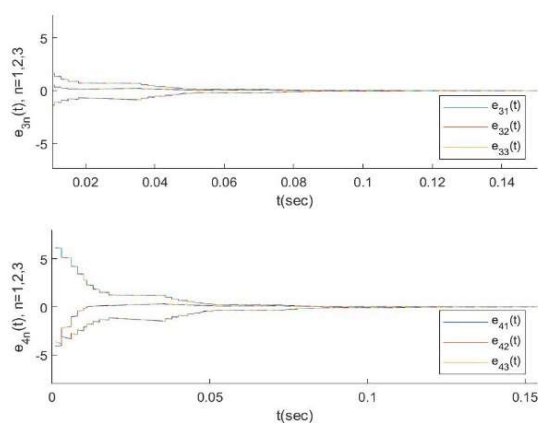


图 4.5 脉冲控制下智能体 3 和 4 的误差状态轨迹

由图 4.4 和图 4.5 可以看出, 在受到随机拒绝服务攻击影响的有效脉冲控制协议作用下, 4 个跟随者智能体和领导者之间的误差状态轨迹呈收敛趋势, 且最终接近于 0。换言之, 被控多智能体系统(4.28)可以实现均值意义下的一致性。

4.5 本章小结

本章在第三章的基础上研究了随机拒绝服务攻击下一类领导-跟随多智能体系统的动态事件触发脉冲控制问题。通过设计动态事件触发协议生成一系列离散的脉冲控制时刻, 利用克罗内克积性质构造统一的误差系统, 基于随机分析技巧给出并证明了受控多智能体系统在随机拒绝服务攻击下实现均值意义下的一致性需满足的充分性条件。最后, 设计一个数值仿真案例, 通过 Matlab 数值仿真来验证本文所得结果的有效性。

第5章 总结与展望

本文主要研究了多智能体系统的一致性问题。首先，针对领导-跟随多智能体系统在静态事件触发规则下设计不同的脉冲控制协议。其次，针对不同脉冲控制策略给出两种不同的拒绝服务攻击，在这两种不同的情况下验证系统可以实现一致性。具体而言，是通过构造误差系统，基于不同的事件触发规则给出了脉冲控制下多智能体系统实现一致性所需的充分条件。同时，考虑到控制信息传输时会受到网络攻击，不妨引入拒绝服务攻击作为干扰脉冲控制的因素。最后，基于给定的假设条件证明了被攻击多智能体系统可以实现一致性。

然而，本人的研究工作也存在诸多不足之处，例如：

- (1) 文章引入拒绝服务共攻击来刻画外界对脉冲控制的干扰，没有考虑到其他干扰；
- (2) 没有考虑在事件触发规则前，系统是否可以稳定，缺少全局性。

展望未来，希望自己在将来的研究工作中能够逐渐将本文存在的不足之处进行完善。

参考文献

- [1] Leitão P, Barbosa J, Trentesaux D. Bio-inspired multi-agent systems for reconfigurable manufacturing systems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(5): 934-944.
- [2] 张秋花, 薛惠锋, 吴介军, 等. 多智能体系统 MAS 及其应用[J]. 计算机仿真, 2007, 24(6): 133-137.
- [3] 张建强, 杨凯军, 欧阳凌丛. 具有规定性能的多智能体动态事件触发编队控制[J]. 计算机工程, 2024, 50(03): 78-88.
- [4] 宋莉, 伍清河. 具有多时变时滞的多智能体系统在切换拓扑下的平均一致性[J]. 控制与决策, 2013, 28(12): 1811-1816.
- [5] Ma Q, Wang Z, Miao G Y. Second-order group consensus for multi-agent systems via pinning leader-following approach[J]. Journal of the Franklin Institute, 2014, 351(3): 1288-1300.
- [6] Zhang Z, Chen S M, Su H S. Scaled consensus of second-order nonlinear multiagent systems with time-varying delays via aperiodically intermittent control[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 50(8): 3503-3516.
- [7] Wu Y, Su H, Shi P, et al. Consensus of multiagent systems using aperiodic sampled-data control[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 46(9): 2132-2143.
- [8] Ge X, Han Q, Ding D, et al. A survey on recent advances in distributed sampled-data cooperative control of multi-agent systems[J]. Neurocomputing, 2018, 275: 1684-1701.
- [9] Tabuada P. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(9): 1680-1685.
- [10] Dimarogonas D, Frazzoli E, Johansson K. Distributed event-triggered control for multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 57(5): 1291-1297.

-
- [11]Brentair M, Urbina S, Arzelier D, et al. A hybrid control framework for impulsive control of satellite rendezvous[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 27(4): 1537-1551.
 - [12]Hernandez-mejia G, Du X, Alanis A Y, et al. Bounded input impulsive control for scheduling therapies[J]. Journal of Process Control, 2021, 102: 34-43.
 - [13]Li X, Li P, Wang Q. Input/output-to-state stability of impulsive switched systems[J]. Systems and Control Letters, 2018, 116:1-7.
 - [14]Liu B, Liu T, Dou C. Stability of discrete-time delayed impulsive linear systems with application to multi-tracking[J]. International Journal of Control, 2014, 87(5): 911-924.
 - [15]Zhao X, Fei S, Sun C. Impulsive controller design for singular networked control systems with packet dropouts[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2009, 7(6):1020-1025.
 - [16]Guan Z, Huang J, Chen G, et al. On the stability of networked impulsive control systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2012, 22(17): 1952-1968.
 - [17]Ai Z, Peng L, Zong G, et al. Impulsive control for nonlinear systems under DoS attacks: A dynamic event-triggered method[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(9): 3839-3843.
 - [18]Yang H, Wang F, Han F. Containment control of fractional order multi-agent systems with time delays[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 5(3): 727-732.
 - [19]Bhat S P, Bernstein D S. Finite-time stability of continuous autonomous systems[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2000, 38(3): 751-766.
 - [20]Xiao Q, Wu Z, Peng L. Fast finite-time consensus tracking of second-order multi-agent systems with a virtual leader[J]. Journal of Networks, 2014, 9(12): 3268.
 - [21]Wang X, Li S, Shi P. Distributed finite-time containment control for double-integrator multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 44(9): 1518-1528.

-
- [22]Cortés J. Finite-time convergent gradient flows with applications to network consensus[J]. Automatica, 2006, 42(11): 1993-2000.
- [23]Zhang Y, Yang Y, Zhao Y, et al. Distributed finite-time tracking control for nonlinear multi-agent systems subject to external disturbances[J]. International Journal of Control, 2013, 86(1): 29-40.
- [24]Chen G, Yue Y, Song Y. Finite-time cooperative-tracking control for networked Euler-Lagrange systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2013, 7(11): 1487-1497.
- [25]Xiao F, Wang L, Chen J, et al. Finite-time formation control for multi-agent systems[J]. Automatica, 2009, 45(11): 2605-2611.
- [26]Lin X, Zheng Y. Finite-time consensus of switched multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 47(7): 1535-1545.
- [27]Liu L, Liu Y, Tong S. Neural networks-based adaptive finite-time fault-tolerant control for a class of strict-feedback switched nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 49(7): 2536- 2545.
- [28]Gao F, Wu Y, Liu Y. Finite-time stabilization for a class of switched stochastic nonlinear systems with dead-zone input nonlinearities[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28(9): 3239-3257.
- [29]Charalambous T, Yuan Y, Yang T, et al. Distributed finite-time average consensus in digraphs in the presence of time delays[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2015, 2(4): 370-381.
- [30]Sundaram S, Hadjicostis C N. Finite-time distributed consensus in graphs with time-invariant topologies[C]. 2007 American Control Conference, New York, USA, 2007: 711-716.
- [31]Polyakov A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 57(8): 2106-2110.
- [32]Zuo Z. Nonsingular fixed-time consensus tracking for second-order multi-agent networks[J]. Automatica, 2015, 54: 305-309.

-
- [33]Ning B, Zuo Z, Jin J, et al. Distributed fixed-time coordinated tracking for nonlinear multi-agent systems under directed graphs[J]. Asian Journal of Control, 2018, 20(2): 646-658.
- [34]Feng Z, Hu G. Secure cooperative event-triggered control of linear multiagent systems under DoS attacks[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 28(3): 741-752.
- [35]Chen X, Hao F. Event-triggered average consensus control for discrete-time multi-agent systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2012, 6(16): 2493-2498.
- [36]Qian Y, Liu L, Feng G. Distributed event-triggered adaptive control for consensus of linear multi-agent systems with external disturbances[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 50(5): 2197-2208.
- [37]Wang Y, Lei Y, Bian T, et al. Distributed control of nonlinear multiagent systems with unknown and nonidentical control directions via event-triggered communication[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 50(5): 1820-1832.
- [38]Fan Y, Feng G, Wang Y, et al. Distributed event-triggered control of multi-agent systems with combinational measurements[J]. Automatica, 2013, 49(2): 671-675.
- [39]Xing L, Wen C, Guo F, et al. Event-based consensus for linear multiagent systems without continuous communication[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 47(8): 2132-2142.
- [40]Cheng Y, Ugrinovskii V. Event-triggered leader-following tracking control for multivariable multi-agent systems[J]. Automatica, 2016, 70: 204-210.
- [41]Cheng B, Li Z. Fully distributed event-triggered protocols for linear multiagent networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 64(4): 1655-1662.
- [42]Qian Y Y, Liu L, Feng G. Output consensus of heterogeneous linear multi-agent systems with adaptive event-triggered control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 64(6): 2606-2613.
- [43]Liu J, Zhang Y, Yu Y, et al. Fixed-time event-triggered consensus for nonlinear multiagent systems without continuous communications[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 49(11): 2221-2229.

攻读硕士期间取得的学术成果

- [1]张东元(作者), 吴小太(导师). 多智能体系统的动态事件触发脉冲控制
[J]. 哈尔滨理工大学学报, (已录用).

致谢

无可奈何花落去，似曾相识燕归来，转眼间，研究生的三年时光就要离去。回首往日，这三年来我收获颇丰，我不仅在学习上遇到了良师，还在生活中遇到了如此之多的益友，也在研究生期间收获了爱情。正是因为有了他们，才让我的研究生生活过得多姿多彩，借此机会向他们表达最诚挚的感谢。

首先，请允许我先感谢我的导师，博士生导师吴小太教授。他知识渊博、治学严谨、待人谦和，这都深深的影响着我。在论文写作过程中，从选题到写作，他都无时无刻的关注着我们，给予我们很大的帮助，就像茫茫大海中的一盏明灯，照亮我们的学习之路。他对我的关心和教导，我会铭记一生，值此机会我想对导师说：您辛苦啦，感谢这一路以来您给予我的帮助。同时也很感谢张振华老师对我的帮助，在后期修改论文时，在百忙之中为我修改论文的措辞，格式。正是有了这些老师们的帮助，才让我的论文得以完成。

其次，我要感谢我的室友们，这三年来我们都其乐融融，没有发生过任何摩擦，且在生活，学习中都给与我很大的帮助。在论文写作过程中，遇到不会的公式，室友都会放下自己手头的工作，积极为我解惑。

接着，我要感谢我的同门，无论我遇到什么样的学术问题，大家都会在一起为我解惑，同时也会陪着我一起熬夜，修改和完善我的论文。无数个日日夜夜大家在一起相互帮助，一起成长，希望我们的同门之情可以一直延续下去。

最后我要感谢我的老婆，每当我在外忙碌事情时，她都能将家里照顾的井井有条，正是有了她的辛苦付出，我才不会感到劳累，感觉每天都元气满满。在我失落的时候，她会积极的鼓励我。在我劳累的时候，她会带我出去放松。从恋爱到结婚再到现在已经过去了8年，希望我俩的感情一直保持下去。

当然，我也要感谢这三年中，所有给予我帮助的老师，同学和朋友，正是因为有了你们的帮助，我才能在研究生生涯中获得知识和快乐，再次感谢大家！