



浙江工业大学

# 本科毕业设计（论文、创作）

题目：基于网络化控制系统的协同设计算法研究

作者姓名 吴利男

指导教师 赵云波 教授

专业班级 健行 1502 班

学 院 健行学院

提交日期 2019 年 6 月 1 日

浙江工业大学本科毕业设计论文

基于网络化控制系统的协同设计算法研究

作者姓名：吴利男

指导教师：赵云波教授

浙江工业大学信息工程学院

2019年6月

**Dissertation Submitted to Zhejiang University of Technology  
for the Degree of Bachelor**

**Research on Collaborative Design Algorithm  
Based on Networked Control System**

**Student: Wu Linan**

**Advisor: Professor Zhao Yunbo**

**College of Information Engineering  
Zhejiang University of Technology**

**June 2019**

# 浙江工业大学


## 本科生毕业设计(论文、创作)诚信承诺书

本人慎重承诺和声明：

1. 本人在毕业设计（论文、创作）撰写过程中，严格遵守学校有关规定，恪守学术规范，所提交的毕业设计（论文、创作）是在指导教师指导下独立完成的；

2. 毕业设计（论文、创作）中无抄袭、剽窃或不正当引用他人学术观点、思想和学术成果，无虚构、篡改试验结果、统计资料、伪造数据和运算程序等情况；

3. 若有违反学术纪律的行为，本人愿意承担一切责任，并接受学校按有关规定给予的处理。

学生（签名）：

2019 年 6 月 1 日

# 浙江工业大学

## 本科生毕业设计（论文、创作）任务书

专业 自动化 班级 健行 15 自动化 学生姓名/学号 吴利男/201524450116

### 一、设计（论文、创作）题目：

基于网络化控制系统的协同设计算法研究

### 二、主要任务与目标：

1. 阅读相关文献，了解本领域研究现状；
2. 了解通信网络的协议；
3. 设计合适的调度算法以及控制器并进行稳定性证明；
4. 撰写毕业论文。

### 三、主要内容与基本要求：

网络化控制系统中具有挑战性的部分是设计可以在无线网络上可靠运行的控制器。从根本上说，通信网络限制了网络化控制系统各个器件中可以交换的信息量，更确切的说，通信网络会产生时延以及丢包。本课题旨在研究合适的网络调度方案，了解现有的路由协议，同时从优化网络以及解决时延丢包两个角度设计网络的调度协议以及控制算法。

### 四、计划进度：

- 2019 开学前 收集相关资料文献，学习相关知识，完成外文翻译、文献综述；熟悉课题，做好开题准备 - 第 1-3 周 完成开题报告，参加开题交流 - 第 4-8 周 了解通信网络的常规协议以及节点调度算法，初步选择调度方案，接受中期检查 - 第 9-14 周 完成最终的控制算法设计，撰写毕业论文 - 第 15 周 修改毕业论文，参加毕业答辩，提交相关文档资料

### 五、主要参考文献：

- [1] E. G. W. Peters, D. E. Quevedo, M. Fu. "Controller and scheduler codesign for feedback control over IEEE 802.15.4 networks", IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 24, no. 6, pp. 2016-2030, 2016. [2] S. A. Areqi, D. Gorges, S. Liu, "Event-Based Control and Scheduling Codesign: Stochastic and Robust Approaches". IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 60, no. 5, pp. 1291-1303, 2015. [3] 王丽媛, 郭戈, 庄严, "网络控制系统发送功率分配问题研究", 自动化学报, vol. 43, no. 8, 2017.

任务书下发日期 2018 年 12 月 25 日

设计（论文、创作）工作自 2018 年 12 月 25 日至 2019 年 6 月 4 日

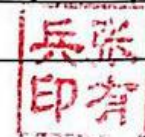
设计（论文、创作）指导教师

赵云波

系主任（专业负责人）

主管院长

张兵



# 基于网络化控制系统的协同设计算法研究

## 摘 要

随着信息化技术的发展,在这个工业 4.0 的时代,网络化控制系统的研究与发展变得日益重要。网络化控制系统中传感器,控制器和执行器之间的信息传输通常通过数据通信网络进行,这使得网络化控制系统具有了高度灵活性,低成本和后期维护简单等优点。而协同设计的优势在于将更多的网络影响(如网络资源限制、运行性能等)融入控制系统设计和性能优化中,在设计控制系统的同时考虑网络实现的问题,从而使得系统的总体性能优化,达到资源共享、快速协调沟通、不受时间空间限制的目的。因此,网络化控制的协同算法设计以及如何处理网络诱导时延等问题成为网络化控制系统研究的关键点,受到了广泛的关注。

本文的研究内容是基于网络化控制的协同设计算法研究,主要针对研究合适的网络调度方案,了解现有的路由协议,同时从解决时延丢包两个角度设计控制算法。论文的主要工作如下:

1. 查阅相关文献资料,综述课题研究背景与意义,介绍相关通信协议和调度算法以及网络化控制系统的协同设计算法的研究现状,并详细说明现有关于解决 NCSs 中时延和丢包问题的协同设计算法。
2. 基于模型依赖的平均驻留时间的切换系统的分析方法,本文针对具有时延和丢包的网络化控制系统,采用增广矩阵的方法建立离散时间系统模型。
3. 针对系统进行状态稳定性分析,给出系统状态满足全局一致指数稳定的条件。
4. 设计系统状态反馈控制器及调度方案,定量描述系统指数衰减率和系统任意丢包率的关系。
5. 利用 LMI 工具箱计算出状态反馈增益  $K$ ,并通过对开环不稳定的控制对象进行数值仿真以及与 LQR 方法进行对比,验证本文所提方法的有效性。

**关键词:** 网络化控制系统, 时延, 丢包, 切换系统, 协同设计

# **RESEARCH ON COLLABORATIVE DESIGN ALGORITHM BASED ON NETWORKED CONTROL SYSTEM**

## **ABSTRACT**

With the development of the information age, in the era of this industry 4.0, the research and development of networked control systems has become increasingly important. In the networked control system, the information transmission between the sensor, the controller and the actuator is often carried out through the data communication network, which makes the networked control system have the advantages of high flexibility, low cost and simple maintenance. The advantage of collaborative design is to integrate network resource limitation, running performance and other network impact into control system design and performance optimization. Consider the network implementation problem while designing the control system, so that the overall performance of the system is optimized and resources are achieved. Share, quickly coordinate communication, and not subject to time and space constraints. Nevertheless, the design of collaborative control algorithms for networked control and how to deal with network induced delays have become the key points in the research of networked control systems, and have received extensive attention.

The research content of this thesis is based on the collaborative control algorithm of networked control. It is mainly for studying the appropriate network scheduling scheme, understanding the existing routing protocols, and designing the control algorithm from the perspective of solving the delay packet loss. The main work of the thesis is as follows:

1. Review relevant literature, summarize the background and significance of the research, introduce the research status of related communication protocols and scheduling algorithms, and networked control systems and collaborative design algorithms, and explain the existing delays and losses in NCSs. Collaborative design algorithm for packet problem.

2. Based on the analysis method of the model-dependent average dwell time switching system, this paper establishes a discrete-time system model for the networked control system with delay and packet loss by using the augmented matrix method.

3. The state stability analysis is carried out for the system, and the condition that the system state satisfies the global consensus index stability is given.

4. Design system state feedback controller and scheduling scheme, and the relationship between the system exponential decay rate and the system arbitrary packet loss rate is quantitatively described.

5. The LMI toolbox is used to calculate the state feedback gain, and the effectiveness of the proposed method is verified by numerical simulation of the open-loop unstable control object and comparison with the LQR method.

**Key Words:** Networked control system, delay, packet, switching system, collaborative design



# 目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 网络化控制系统概述.....	1
1.2.1 网络化控制系统概念.....	2
1.2.2 网络分类与通信协议.....	2
1.3 主要研究内容.....	3
1.4 本章小结.....	3
第 2 章 网络化控制系统的协同设计概述.....	4
2.1 网络化控制系统中的调度问题.....	4
2.1.1 实时任务调度.....	4
2.1.3 网络层的数据包调度.....	6
2.1.4 可调度分析及调度优化.....	7
2.2 网络化控制系统的协同设计.....	8
2.2.1 NCSs 的协同设计研究的问题.....	8
2.2.2 NCSs 的协同设计研究现状.....	10
2.3 LMI 工具箱介绍.....	11
2.4 本章小结.....	12
第 3 章 具有时延和丢包的网络化控制系统的协同设计.....	13
3.1 问题描述.....	13
3.2 系统建模.....	14
3.2.1 切换系统介绍.....	14
3.2.2 模型建立.....	14
3.3 系统稳定性分析.....	17
3.4 系统控制器设计及调度方案设计.....	20
3.4.1 控制器设计.....	21
3.4.2 调度方案设计.....	23
3.5 数值算例仿真.....	24
3.6 本章小结.....	26
第 4 章 总结与展望.....	27
4.1 毕设工作总结.....	27

4.2 未来展望.....	27
参考文献.....	29
附录：LMI 求解及仿真程序.....	32
致 谢.....	37

# 第1章 绪论

## 1.1 课题研究背景及意义

随着控制领域和科学技术迅猛发展，互联网已经成为人们工作、生活中不可或缺的事物。然而要实现数据的共享、交换和集成，单台计算机的处理能力以及传统的点对点方式已经远远不能满足人们生活和生产的需求，因此必须利用计算机网络将分布在不同空间的各个子系统互联在一起，使得数据信息得到调度，从而大大提高数据交换、集成和共享的能力。正式技术的发展和市场的需要，推进了网络化控制系统的产生。

在传统的控制理论中，相互联系的动力系统通过理想通道连接在一起，对于非通信系统来说则通过不完善的通道发送信息，而在网络化控制系统中，则有必要将这两个方面相结合，对控制系统进行实际性建模。经过长年的发展，现如今网络化控制系统泛指的是计算机技术、通信网络和控制科学技术的交叉以及相应的成果，它的基本原理是将某区域现场的控制器、传感器以及执行器通过通讯网络相结合，以达到数据传输、资源共享和远程控制的目的。而本文研究课题网络化控制系统的协同设计是指通过控制器和网络使得不同的系统联合成一个整体共同完成一项任务。在这种方式下，可以大幅度降低时间、空间对任务完成度的干扰，从而更高效的达到目标。因此如何设计一个协同设计算法作为网络化控制系统的核心使得网络化控制系统更加高效就是本文的研究目的。

在网络化控制系统中，控制器、传感器和执行器之间的数据信息传输往往是通过数据通信网络进行的，这使得网络化控制系统有了高度灵活性，低成本和后期维护简单等优点。而协同设计的优势在于将传输性能、网络资源限制等更多的网络影响与控制系统设计和性能优化融合，在设计网络化控制系统的需要同时考虑网络实现等问题，从而使得系统的总体性能得到优化，达到资源共享、快速协调沟通、不受时间空间限制的目的，并且更好地理解控制和通信的相互作用。因此，网络化控制的协同算法设计以及如何处理网络诱导时延等问题成为网络化控制系统研究的关键点，受到了广泛的关注。

## 1.2 网络化控制系统概述

### 1.2.1 网络化控制系统的概念

网络化控制系统 (Networked Control Systems, NCSs) 也被称为网络控制系统、基于网络的控制系统, 它能够通过通信网络实现典型空间分布的控制器、传感器和执行器之间的信息交互, 是一种完全实现网络化、分布式的控制系统, 从而实现资源的共享、复杂环境下的大系统控制和远程控制<sup>[1]</sup>。例如, 基于现场总线技术和工业以太网的网络化控制系统都能够被视为是一种狭义上的网络化控制系统。从广义上将, 广义的网络化控制系统除了包括狭义的在内之外, 还包括通过企业信息网络、互联网以及企业内部网络, 实现对工厂现场设备、车间包括生产线的远程控制、数据分析以及信息处理等操作。

### 1.2.2 网络分类与通信协议

NCSs 中的网络一般可分成数据网络和控制网络两种类型<sup>[2]</sup>。控制网络中常用的一种结果是总线拓扑结构。而支持频率低或者突发性的大容量数据传输的是数据网络, 例如以太网。比起控制网络, 基于数据网络的控制系统则需要在系统的实时性以及数据包的丢失问题上更加严格的考虑, 例如工业以太网<sup>[3,4]</sup>。

当前, 各种控制网络正处于一种遍地开花的竞争势头上。NCSs 中的介质访问控制 (MAC) 层协议以及常见的工业通信网络如表 1-1 所示。

表 1-1 NCS 中的介质访问控制 (MAC) 层协议以及常见的工业通信网络

MAC 协议		循环服务网络	随机访问网络
CSMA	CSMA/BA		DeviceNet, CAN
	CSMA/CA		WLAN(IEEE802.11)
	P-坚持 CSMA/CD		Ethernet
	预测 P-坚持 CSMA/CD		LonWorks
令牌	分布式令牌	PROFIBUS, FDDI	
	集中式令牌	FF, WorldFIP	
	虚拟令牌	P-Net, ControlNet	
TDMA		TTCAN, FTTCAN, FireWire	TTCAN, FTTCAN

过去, 总是假设传统的计算机控制系统对被控对象的采样是等周期的, 虽然

这种假设方法能够使得对系统的分析大大简化，但是这种假设在 NCSs 中不一定成立，因为它最终还是取决于 MAC 协议。MAC 协议一般定义上被分为调度和随机存取两种类型<sup>[5]</sup>。随机访问网络中最常用的协议之一是载波侦听多路访问（CSMA），但是它并不能保证等间隔的采样；而时分多路访问（time division multiple access, TDMA）和令牌传递（token passing）则是调度网络中最常用的协议，它可以根据预定的时间调度表通过每一个节点来传递信息，因此在理论上可以实现等间隔采样，但是除此之外还要考虑到同步通道的抖动。因而采用不同的 MAC 协议将会直接改变 NCSs 时变的传输周期。

### 1.3 主要研究内容

首先，本文研究的内容是针对具有随机短时延和丢包的网络化控制系统进行协同设计算法的研究，进而能够减低甚至消除时延和丢包对系统性能的影响。

本文的研究将会有以下步骤：

- （1）具有时延和丢包的网络化控制系统的模型建立；
- （2）系统指数稳定性分析，证明系统指数稳定；
- （3）系统指数稳定性控制器设计；
- （4）系统调度方案的选取；
- （5）数值案例仿真；

### 1.4 本章小结

本章简要介绍课题的研究背景及意义，并对网络化控制系统的概念以及网络分类和协议进行了介绍，为后续算法选择和设计做好准备。最后，介绍了本文的主要研究内容及安排。

## 第 2 章 网络化控制系统的协同设计概述

对于 NCSs 中每个控制回路来说,其性能不仅是取决于控制算法,还取决于系统资源的分配。一般而言, NCSs 的调度可以看做是用于在网络化控制系统中的各种控制途径和数据节点之间共享控制系统资源的分配方式。可以根据不同的实现方法将调度分为静态调度和动态调度。静态调度指的是在系统在离线的场景下,根据对系统资源进行合理的分配。在网络调度中,可以使用令牌,即采用轮询或者其他方法来实现。而在 CPU 调度中可以依据专门的调度算法生成不同人物执行的时间分配表。静态调度的优势是能够保证系统资源分配的公平性,但是也存在一些缺陷,例如,在不可预期的运行环境中系统的性能往往很难达到预期。动态调度指的是根据系统运行的环境以及各节点的实际情况,在系统运行的过程中,实时的对系统资源进行分配。相比较静态调度,动态调度具有适应性强、易于调节和智能化等特点,并且能够在难以把控的运行环境中稳定地运行。

本章将会对网络化控制系统中的调度问题以及 LMI 仿真工具箱进行阐述。

### 2.1 网络化控制系统中的调度问题

#### 2.1.1 实时任务调度

实时任务调度依据控制类型来分类,一般被分成两种类型:开环调度和闭环调度。其中开环调度是指依据提前设定好的算法,在离线情况下生成提供给不同任务执行所需的时间分配表。由于算法是在离线情况下预先给定的,这意味着调度功能被弱化,相当于只有分派器的属性。这两种类型的调度方法在空间、时间复杂度以及算法优缺点等方面各有优势。

##### 1. 开环调度

依据任务的优先级分配原则来划分,开环调度算法可分为静态调度、动态调度和混合调度三类<sup>[21]</sup>。典型的静态调度策略和动态调度策略分别有单调速率(rate monotonic, RM)算法和最小截止期优先(earliest deadline first, EDF)算法。其中,当任务最后的截止期限等于任务周期时, RM 算法实际上算是截止期单调(deadline monotonic, DM)算法的一个特殊例子。类似地,由于它们均属于开环

调度策略，因此在短期易把控的环境中能够达到一个很好的效果，在不可预见的环境下就无法拥有一个良好的控制性能。因此，对于复杂应用的时间需求来讲，开环调度的出镜率较弱。

## 2. 闭环调度

随着技术的不断提升和研究所需，近年来出现了诸如自适应调度和智能调度等调度策略。一般来说，在设计网络控制系统时，若是使用基于最差执行时间的优先级调度算法则会导致系统采样速度不够快，利用率低和控制性能低等情形。采用基于平均执行时间的优先级调度设计则会使得采样速度加快、利用率升高和控制性能变差等情况。为了解决上述问题，可以采用基于反馈的动态调度策略，系统反馈调节器通过接收并处理系统反馈回来的执行时间不断地计算 CPU 利用率，使得系统的采样周期不断被调整，从而保持在较高的给定标准。除此之外，该控制器还有多种控制模式，可以通过在前馈回路和反馈调节器之间进行的信息传输，使得在当切换控制模式时能够调整并提高系统的控制性能。

### 2.1.2 应用层的控制任务调度

应用层的控制任务调度指的是 NCSs 控制环连同其它节点在网络上共享数据信息时所采取的一种系统资源分配的方式。一个值得应用的调度策略要能够保证以下性能：一方面可以优化不同的控制网络的网络带宽占有率，从而提升系统的控制性能；另一方面能够优化不同节点对于网络的争用中的优先权，并减少相应占用时间，从而有效减少数据包发送时的等待时间。

#### 1. 多优先级调度

在数据包封装时，数据必须有特定相关协议的帧格式。每一个数据帧可以依据不同的数据帧格式，在其对应的帧字段中设置不同的能够安排数据包发送顺序的优先级。目前就有很多协议能够设置优先级，例如：令牌传递网络、CSMA 协议等。

#### 2. 控制回路带宽调度

系统控制性能会受到 NCSs 中每个回路的采样周期的影响，同时在采样时刻每个回路的传感器节点对网络信道的争用也会受到其数据传输也会对影响，因此各个控制回路采样回路的大小可以从控制回路特有的网络带宽中直接反映出来。

在共享网络资源后，NCSs 中网络调度的负担以及网络负荷会因为采样频率

过快而增大，网络的负荷增加，从而使得控制系统的性能变差。图 2-1 呈现了在不同采样频率条件下网络控制系统、离散控制系统和连续控制系统的系统性能比较<sup>[22]</sup>。

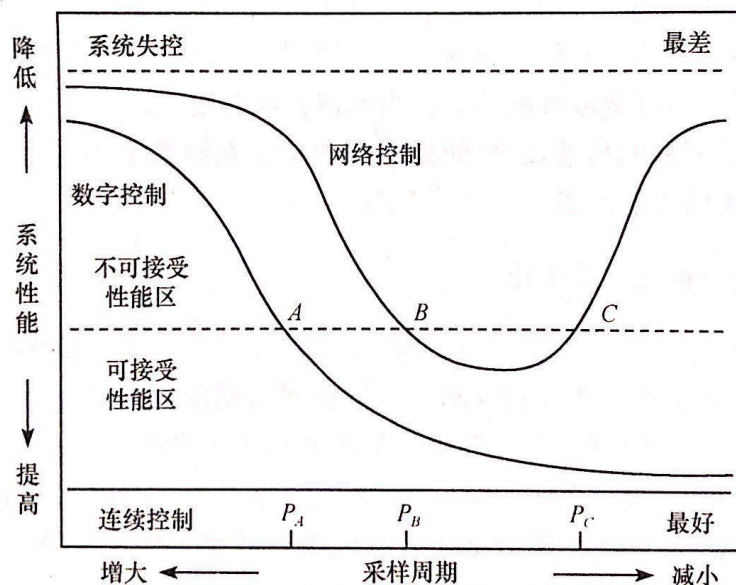


图 2-1 网络控制、离散控制和连续控制系统的性能比较

当网络上各节点需要确定采样周期时，需要考虑以下内容：控制对象的稳定性以及网络的可调度性。如何在网络上负载较多但是网络资源有限时，如何有效地调整数据包的传送速率，并且尽可能地降低数据包在传输时的丢包率以及传输时延就显得至关重要。

### 2.1.3 网络层的数据包调度

一个复杂的网络化控制系统包括控制网、广域网、局制网以及信息网络和控制网络的相互连接，例如罗克韦尔自动化公司所提出的控制层、信息层和设备层的体系结构。这些在 NCSs 中按照规定长度和格式打包而成的数据包，在传输时会经过各种类型的通信网络。对于途径每个子网的优化路径需要做到使得不会出现通信线路超负荷工作，而存在其他处于闲置状态的通信线路的情形。这种共享网络资源的调度可以通过拥塞控制和合理选择网络层的路由来解决。



作为网络层软件的一部分，路由抉择算法负责调整接收到的数据包所属的外送传输路线。无论子网选择哪种路由，路由选择算法都应该能够使得系统保证稳定性，并且从整体上看，整个系统调度要体现全局最优性。

路由选择算法可分为非自适应算法和自适应算法两类。作为一种静态路由选择算法，在当前网络中，对负载实际测量或者估计得到的情况并不能作为非自适应算法作出路由选择的依据。而自适应算法则是一种动态过程，可根据网络负载和拓扑结构的实时情况，相应地选择路由。如今，常见的路由选择算法包括最短径路由选择、链路状态选择、基于距离矢量路由选择和流量的路由选择等。

当过多的数据包拥堵在一个通信子网中，该子网性能必定会下降，我们将其称之为拥塞。好比堵车，当一条“道路”出现了拥塞表明其负荷已经超过了其所承受能力，如果无法利用路由器及时地对其进行疏通，将会导致系统出现恶性循环。因此，当通信网络通过的数据流量超过其所能处理的上限时，就必须及时地采取拥塞控制等手段进行处理，从而优化网络以获得理想的控制性能。

拥塞控制算法可分为开环算法和闭环算法两类。其中开环算法又可根据作用端位置分为作用于目标端的控制算法和作用于源端的控制算法。闭环算法还可以再细分为显式反馈和隐式反馈两类。它们的区别在于，在显式反馈中，拥塞点会将警告数据发送给源端传输。在隐式反馈中，源端则会对是否存在拥塞进行判断。

#### 2.1.4 可调度分析及调度优化

可调度分析和调度优化是每个应用性强的调度算法需要考虑两个方面。NCSs 中的可调度分析可分为 CPU 实时调度和网络调度的实时调度两类。其中，实时调度的可调度分析侧重于解决当调度策略给定但是计算资源受限时，各个实时任务应满足的条件。而网络调度的可调度分析侧重于解决当调度策略给定但是计算资源受限下，各个控制回路中的数据传输应满足的条件。网络的信息调度是不可抢先的。

网络的调度通常是把 CPU 实时调度的不可抢先的可调度分析推广到网络调度中。除此之外，在对控制回路的带宽进行调度时，各个回路的采样周期在考虑到稳定性以及系统带宽时所需满足要求就是它的可调度条件。

寻求一个能够使得性能计算函数取得最大（或者最小）的调度策略，或者通

过对某类传输协议进行改进从而实现调度目标的优化,就称为调度优化。由于这些优化问题只不过是带有约束的极值问题,因此可以使用数学求解规划的方法对它们进行求解,如二次规划、线性规划等,也可以直接采用现有的优化方法进行求解,如模拟退火算法、遗传算法以及神经网络优化算法等。调度优化也可以结合调度与控制的协同设计来实现。

## 2.2 网络化控制系统的协同设计

协同设计方法就是对 NCSs 中控制和通信两方面问题进行综合分析,不仅包括研究 NCSs 中的模型建立、稳定性分析和控制器设计等控制问题,还要考虑调度方法、量化因素、网络因素等通信问题,这更加充分地体现了 NCSs 性能的适用性以及一体化设计的需求,因此受到了广泛的关注。

### 2.2.1 NCSs 的协同设计研究的问题

由于不同的网络的通信协议不尽相同,因此由控制系统不同类型的网络介入而产生的网络诱导时延也会产生差别。此外,在不同的网络化控制系统中,由于调度方案的不同,信息的传输方式也会不尽相同,这会给系统带来丢包和数据包的时序错乱等问题。

#### 1. 网络诱导时延

由于网络干预而导致控制系统在进行信息传输时引起的时延被称为网络诱导时延。常常在控制系统的数据传输通道中存在时延,会给网络的稳定性与动态特性造成极大的影响,甚至会导致系统不稳定<sup>[6-9]</sup>。时延往往与节点驱动方式(如事件驱动或时间驱动)、相关的网络协议以及数据包是否丢失等因素有普遍联系。时延的长度不尽相同,可能会超过一个采样周期,也有可能小于一个采样周期。对于 NCSs 中存在着的各类不同特性的时延,由于通信协议的不同, NCSs 中存在着的各类不同特性的时延,可能是有界的,可能是恒定的,也可能是随机的。例如,采用 CSMA/CD 协议的 Ethernet 网络的时延就是无界的、随机的;而采用 CSMA/BA 协议的 CAN 总线的时延则是有界的、随机的;对于采用令牌传输协议的网络的时延又是有界的、确定的。由此可知,我们可以建立三种类型的网络

诱导时延模型，即固定时延、随机时延和时变时延<sup>[10]</sup>。通常网络诱导时延可表示为以下形式

$$T_{\text{delay}} = T_{\text{pre}} + T_{\text{wait}} + T_{\text{tx}} + T_{\text{post}} \quad (2-1)$$

其中： $T_{\text{pre}}$  为发送处理时延； $T_{\text{wait}}$  为等待时延； $T_{\text{tx}}$  为传输时延； $T_{\text{post}}$  为接收处理时延。

网络化控制系统中的时延主要是等待时延，然而这是无法避免的。等待时延的变化与网络节点数和数据量的变化相关，呈正比例关系，即随着它们的增加而增大。由于介质访问控制机制的差异，即便工作状态正常、网络流量基本稳定，对于采用不同协议的系统来说，它们的时延也仍然会产生很大的差别，而且这种差别在网络流量波动时，还会进一步增大。至于时变的网络诱导时延，假如它大于采样间隔，那么在控制器的同一采样间隔内有可能会到达一个以上的时延后的传感器数据包，但是控制器只会选择最新达到的那个数据包，由此便产生了样本拒绝（data rejection）；另外，也有可能就会导致，在一些控制器的采样间隔内无传感器数据包的到达，因而就产生了空采样（vacant sampling）。这两种情况导致的结果是系统性能降低以及控制器的失真，最终这种高频噪声将会加剧执行器的额外磨损。

## 2. 网络中数据的传输

控制系统的传感器、控制器和执行器中的数据传输是通过在网络上以这种形式网络传输来实现将数据和控制命令封装在数据包中来实现。通常，数据包的传输会涉及到单包和多包传输、数据包乱序以及丢包等问题。

### (1) 单包和多包传输

单包和多包的区别就是数据包的个数。单包传输，显而易见，就是将 NCSs 中的传感器节点或控制器节点上已发送的数据用对应的数据帧格式封装到单个数据包中并发送。多包传输则是指将 NCSs 中的传感器节点或控制器节点上的未发送数据用对应的数据帧格式封装到多个数据包中并发送。采用多包传输一般出于两个主要原因：一方面，不同类型的网络由于单包字节容量不同，导致其封装数据的大小也不同，因而适合的传输类型也有所不同，例如，Ethernet 可以将多达 1500 个字节保存于一个数据包中，因而更加适合单包传输大批量的数据文件；

而 DeviceNet 只能在一个数据包中保存仅 8 个字节，因而更加适合快速传输多包小数据<sup>[5]</sup>。另一方面，当 NCSs 的传感器和执行器分布的物理空间很大时，是难以实现将这些数据全部都放入一个数据包中的。因此，即便是采用多包传输的 NCSs 的被控对象，它也未必是多输入多输出（MIMO）系统；相应的，采用单包传输的 NCSs 的被控对象，它也未必不是 MIMO 系统。

### (2) 数据包乱序

数据包乱序指的是目标节点接收到的数据包的排序与源节点数据包的发送顺序不完全相同。数据包乱序通常发生在于具有网关、路由等中继环节的 NCSs 中。数据包乱序一般可分为单包传输的乱序和多包传输的乱序这两类。在单包传输中，由于传输的是单个数据包，每个数据包的数据都是完整的，因此错乱只会发生在从源节点出发到目标节点的数据的先后顺序上。在多包传输中，由于单个数据会被分成多个数据包进行传输，当这些数据包从源节点出发到目标节点时，很有可能达到的顺序也会与原有顺序不一致。因此，多包传输可能会出现不同时刻的数据包的时间顺序发生错乱，也有可能即便是在同一时刻发出的不同数据包的到达时间也会不一样。

### (3) 丢包

丢包是指数据包在从源节点传输到目标节点的过程中发生丢失的现象。数据包的丢失的原因有：网络的拥堵、能量的受限、连接中断等。从丢包原因上来看，丢包可以分为主动丢包以及被动丢包。为了系统的性能优化，主动丢弃部分数据包，被称为主动丢包。为了解决网络的拥堵问题，常常会采取丢弃部分相对不重要的数据包的方式。为了保证信息的实时性，主动丢包不会重新发送信息，始终传输最新的数据。而在那些具有重传输机制的网络中，如果数据包的重传次数已经超过允许上限并且仍然未能发送成功，那数据包不得而被丢弃，这种现象就被称之为被动丢包。一般来说，反馈控制系统中的丢包率有一定上限，这是系统稳定约束的一个界限，当丢包率达到一定界限时，系统就会变得不稳定<sup>[5]</sup>。

## 2.2.2 NCSs 的协同设计研究现状

本文主要研究针对具有网络化诱导时延和丢包情形的网络化控制系统的协同设计。接下来就将对具有时延和丢包的 NCSs 的分析和研究进行一个探讨。

对于网络化控制系统中存在的时延和丢包这种情况，文献[11-12]是将其转化为时变时滞系统，并且针对网络存在连续丢包有界和固定时延，给出了系统状态渐近稳定的条件。文献[13-15]使用具有时间束缚的异步动态系统来描述系统，并且给出了系统指数稳定的充分条件。文献[16]中，随机时延通过缓冲器被转变为固定时延，并且将连续丢包有界和时延情形建模成系统参数随采样率变化的切换系统，得出了使得系统一致稳定的条件。文献[17]则提出了一种状态预估的补偿策略，该策略是将系统中的参数建模成能随时延变化的切换系统，并且给出了当最大连续丢包数有界时，使系统满足系统  $H_\infty$  性能的时变时延一致稳定的设计方法。文献[18-20]则是采用基于平均驻留时间的方法，给出了存在随机丢包的网络化控制系统的切换系统指数稳定的条件。

总的来说，目前虽然对具有时延和丢包的网络化控制系统的研究越来越多且越来越广泛，控制效果以及性能也越来越好，但是总体上还是远远不够的，创新性的控制算法少之又少。因而该领域还需要更多的研究上的努力。

### 2.3 LMI 工具箱介绍

本节将简要对本研究中求解状态反馈增益时使用到的线性矩阵不等式(LMI)工具箱进行介绍。

线性矩阵不等式(LMI)是一种用于求解一般线性矩阵不等式问题的高性能软件集成包。LMI 用于表示不同结构的线性矩阵不等式，其表示形式为自然块矩阵，可以描述各种线性矩阵不等式。想要对问题进行数值求解，就需要明确这个线性矩阵不等式问题，并为求解这个问题调用合适的线性矩阵不等式求解器。

LMI 工具箱中有多种具有确定、处理和数值求解功能的线性矩阵不等式工具，它们的作用主要在于：

- (1) 以自然块矩阵的形式直接描述线性矩阵不等式；
- (2) 获得现有线性矩阵不等式系统的相关信息；
- (3) 调整和改进已有线性矩阵不等式系统；
- (4) 对至多三个一般性的线性矩阵不等式问题进行求解；
- (5) 结果验证。

在二十世纪六十年代，线性矩阵不等式的概念就已经被提出。但由于它的算

法在当时还不够完善，且求解量大，导致在实际研究中线性矩阵不等式难以得到充分应用，尤其是在控制领域。近年来，由于对求解线性矩阵不等式的需求日益加大，线性矩阵不等式的理论日益完善，各式求解算法日益成熟，以及计算机的广泛应用，线性矩阵不等式的求解愈加方便，从而进一步使其在实际工程中以及控制工程理论中得到了更加广泛的应用。如今出现的许多计算机应用软件都得益于线性矩阵不等式的发展和应用，其中以美国 MathsWorks Inc 公司用 C 语言开发的 MATLAB 软件最受使用者喜爱。除此以外，MATLAB 的 5.1 版本中还开发了一个 LMI 控制工具箱，是应用于线性矩阵不等式的求解的，为求解提供了极大的便利。十多年以来，线性矩阵不等式就已被广泛用于解决控制系统中的问题，并逐渐成为了控制领域中越来越热门的热门研究领域。一般来说，通过基于控制理论条件建立线性矩阵不等式，再使用 Matlab 中的 LMI 工具箱求解是常用的求解方法。但是 LMI 工具箱的局限性在于一般只能处理具有固定形式的线性矩阵不等式。LMI 之所以一问世就受到了模糊控制领域研究人士的广泛关注，是由于它的模糊控制理论能够有效解决如何利用 Lyapunov 分析方法以及如何设计模糊控制器等重要问题。相较于经典的凸优算法，LMI 控制工具箱采用的是内点法的 LMI 求解器，使其优化速度有了明显的提升。此外，它所采用的简洁而有效的 LMI 结构化表示，简单易懂并且利于推广，也促使其在求解和计算领域做出了巨大的贡献。总之，基于 LMI 的控制理论和方法近年来已成为控制领域的热门研究对象。

## 2.4 本章小结

本章主要是介绍了网络化控制系统的调度问题，包括调度策略以及如何选择调度算法，为接下去第三章的调度算法设计做准备。并且对于网络化控制系统的协同设计问题以及当前国际和国内该领域的研究现状进行了介绍。本章还介绍了 Matlab 中的 LMI 工具箱的研究与作用，为第三章的状态反馈增益的求解做了理论准备，便于最终的系统仿真。

### 第 3 章 具有时延和丢包的网络化控制系统的协同设计

本文主要研究的是具有时延和丢包的网络化控制系统，在第一章中，本文曾经提到目前针对这类系统，很多研究方法是采用将系统建模成一个切换系统，本文也将采用这种方法。在本章中将会对本文研究的系统以及问题进行一个描述，并且会对系统进行模型的建立。

#### 3.1 问题描述

首先，本文研究的对象是具有时延和数据丢包的网络化控制系统，其结构图如图 3-1。

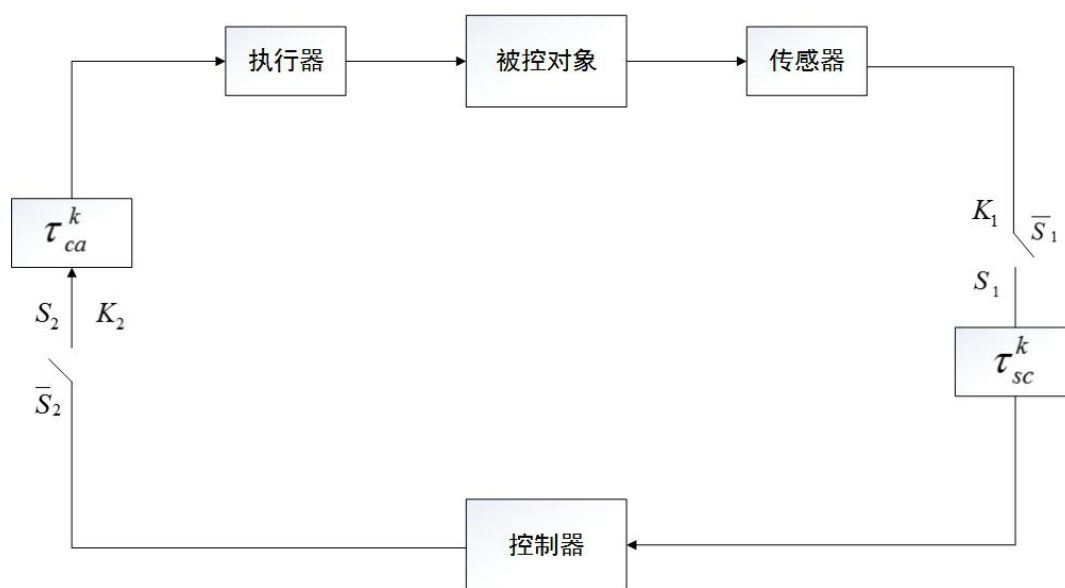


图 3-1 网络化控制系统结构图

一个网络化控制系统最基础的结构就是包括执行器、控制器、传感器以及被控对象，由于本系统中还包含了时延和丢包，因此对其作出如下合理假定：

- (1) 传感器采用的是时间驱动模式，周期为  $T$ 。
- (2) 执行器和控制器都采用事件驱动模式，只有当有新的数据信息到达时，才会执行相关的操作。另外，执行器将采用零阶保持器法输出，若系统发生数据包丢失，则执行器会沿用上一周期的信息。
- (3) 本文不考虑控制器的运算时间以及执行器读取缓冲器数据的时间，只

考虑两个时延，即传感器到控制器（S-C）以及控制器到执行器（C-A）的随机传输时延  $\tau_k^{sc}$ 、 $\tau_k^{ca}$ ，并且需要满足总时延小于采样周期，即  $\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^{ca} < T$ 。

（4）系统的丢包率与传感器发射功率相关。

本文要做的就是针对这样一个具有时延和丢包的网络化控制系统研究其协同设计算法，进行控制器设计、稳定性分析、调度方案设计等工作。

## 3.2 系统建模

### 3.2.1 切换系统介绍

首先切换系统是一类典型的混合动态系统，类似于分段函数的概念，他是由多个子系统（子模态）以及对它们之间关系进行描述的逻辑规则构成。这些逻辑规则又被称为切换信号，类似于分段函数中的分段条件。可以说切换系统的基础就是切换，这种切换思想在日常生活中随处可见。正如之前所提的分段函数，还有继电器两种模式的切换：闭合和断开，以及生活中车主很熟悉的齿轮变速器档位的切换都是这种切换思想的体现。实际上，多控制器系统基本上就是一个典型的切换系统。

自提出以来，切换系统就一直都是控制领域的研究热点。近年来，切换系统在模型建立、稳定性分析等方面都有很大的进展。也正是由于切换系统的应用前景非常可观，它备受控制领域研究的关注。很多实际的系统，例如航天控制系统、电动机系统等，在不同的环境或者控制策略下会呈现出不同的模态，因此使用切换系统对其进行研究将会非常合适。但是切换系统的动态性能也具有一定的复杂性，即使能保证所有子系统的稳定性，设计出来的切换信号也无法完全包住整个系统的稳定性，即整体的性能并非简单地由各个模态性能的简单相加，甚至会出现截然相反的性能，因此在切换系统的研究上还需要很大的努力。

本章在模型建立上也会利用切换系统来建立研究对象的系统模型。

### 3.2.2 模型建立

假设被控对象的连续时间状态空间模型为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3-1)$$



式中， $A$ 、 $B$  为适当维数的系数矩阵， $x(t) \in R^n, u(t) \in R$  分别为系统的  $n$  维状态向量和系统的控制输入。

正如第一章所提到的，数据信息在通信网络中进行传输时，不可避免地会产生网络诱导时延。假定系统的总时延  $\tau_k < T$ ，那么在时间周期  $[kT, (k+1)T]$  和  $[(k+3)T, (k+4)T]$  内，如图 3-2 所示。

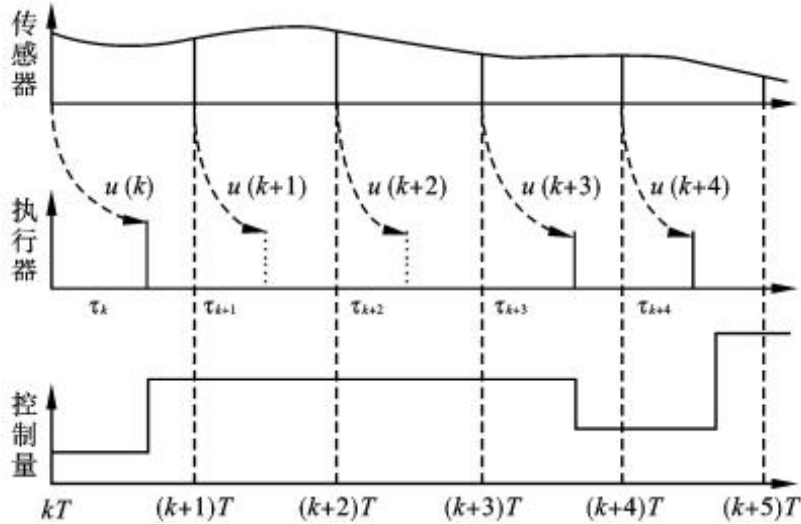


图 3-2 具有双边时延和数据丢包的 NCSs 信号时序图

则对于只存在时延的系统，可以相应地将连续状态空间模型 (3-1) 转变为当前的系统工作模型  $S^{(0)}$ ：

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma_0(\tau_k)u(k) + \Gamma_1(\tau_k)u(k-1) \quad (3-2)$$

式中， $\Phi = e^{AT}, \Gamma_0(\tau_k) = \int_0^{T-\tau_k} e^{A\sigma} d\sigma \cdot B, \Gamma_1(\tau_k) = \int_{T-\tau_k}^T e^{A\sigma} d\sigma \cdot B$ 。

当数据包在通信网络中进行传输时，如果除了存在时延外，因为外界的强烈干扰或者网络负载的变化而导致数据包发生丢失，则可以采用零阶保持器输出方式解决。当系统发送丢包时，本文采用零阶保持器输出方式，使执行器始终保持上一时刻的值，即  $u(k) = u(k-1)$ 。如上图 3-2 所示，在时间周期  $[(k+1)T, (k+2)T]$  和  $[(k+2)T, (k+3)T]$  内，则对于即存在时延又存在丢包的系统，可以相应地将连续状态空间模型 (3-1) 转变为当前的系统工作模型  $S^{(1)}$ ：

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma_2 u(k-1) \quad (3-3)$$

式中,  $\Gamma_2 = \int_0^T e^{A\sigma} d\sigma \cdot B$ .

令系统的增广矩阵  $m(k) = [x^T(k) \quad u^T(k-1)]^T$ , 就可以将系统的两个工作模型 (2) 和 (3) 进行归纳描述成一个离散时间切换开环系统模型  $S_{ok}$ :

$$m(k+1) = \bar{\Phi}_{\sigma(k)} m(k) + \bar{\Gamma}_{\sigma(k)} u(k) \quad (3-4)$$

$$\text{当 } \sigma_k = 0 \text{ 时: } \bar{\Phi}_0 = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_1(\tau_k) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \bar{\Gamma}_0 = \begin{bmatrix} \Gamma_0(\tau_k) \\ I \end{bmatrix}$$

$$\text{当 } \sigma_k = 1 \text{ 时: } \bar{\Phi}_1 = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_2 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad \bar{\Gamma}_1 = 0$$

进一步, 令  $\bar{F}(\tau'_k) = \int_0^{\tau'_k} e^{A\sigma} d\sigma \quad \tau'_k \in [-T/2, T/2]$ , 则有

$$\begin{aligned} \omega &> \max_{\tau'_k \in \{-T/2, T/2\}} \|\bar{F}(\tau'_k)\|_2 = \left\| \int_0^{T/2} e^{A\sigma} d\sigma \right\|_2 \\ \Gamma_0 &= \int_0^{T/2} e^{A\sigma} d\sigma \cdot B \quad \Gamma_1 = \int_{T/2}^T e^{A\sigma} d\sigma \cdot B \\ D &= \omega e^{AT/2} \quad E = B \quad F(\tau'_k) = \omega^{-1} \int_0^{\tau'_k} e^{A\sigma} d\sigma \end{aligned}$$

则有:

$$\begin{aligned} \Gamma_0(\tau_k) &= \int_0^{T-\tau_k} e^{A\sigma} d\sigma \cdot B = \int_0^{T-T/2-\tau'_k} e^{A\sigma} d\sigma \cdot B \\ &= \int_0^{T/2} e^{A\sigma} d\sigma \cdot B + \omega e^{AT/2} \cdot \omega^{-1} \int_0^{\tau'_k} e^{A\sigma} d\sigma \cdot B \\ &= \Gamma_0 + DF(\tau'_k)E \\ \Gamma_1(\tau_k) &= \int_{T-\tau_k}^T e^{A\sigma} d\sigma \cdot B = \int_{T-T/2-\tau'_k}^T e^{A\sigma} d\sigma \cdot B \\ &= \int_{T/2}^T e^{A\sigma} d\sigma \cdot B - \omega e^{AT/2} \cdot \omega^{-1} \int_0^{\tau'_k} e^{A\sigma} d\sigma \cdot B \\ &= \Gamma_1 - DF(\tau'_k)E \end{aligned}$$

因此有  $F^T(\tau'_k)F(\tau'_k) = \sigma^{-2} \bar{F}^T(\tau'_k) \bar{F}(\tau'_k) < I$ 。并且令  $\lambda_{\max}(X)$  为矩阵  $X$  的最大特征值、 $\lambda_{\min}(X)$  为矩阵  $X$  的最小特征值以及  $*$  表示对称矩阵部分。

本文采用增广矩阵信息反馈控制, 对于离散时间开环切换系统模型 (3-4) 给出相应的控制器  $u(k) = Km(k)$ , 那么就可以得到具有参数不确定性的离散时间

闭环切换系统模型  $S_{Ck}$  .

$$m(k+1) = \tilde{\Phi}_{\sigma_k} m(k) \quad (3-5)$$

式中,  $\tilde{\Phi}_0 = \hat{\Phi}_0 + \hat{\Gamma}K + \hat{D}F(\tau'_k)(\hat{E}_0 + EK)$ ,  $\tilde{\Phi}_1 = \bar{\Phi}_1$ ,  $\hat{\Phi}_0 = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\hat{\Gamma} = \begin{bmatrix} \Gamma_0 \\ I \end{bmatrix}$ ,  
 $\hat{D} \begin{bmatrix} D \\ 0 \end{bmatrix}$ ,  $\hat{E}_0 = [0 \quad -E]$ .

在无论在一定丢包率的条件下, 并且只考虑是否丢包的情况, 系统最终只会出现两个结果, 即出现数据包丢失或未出现数据包丢失, 因此, 可根据切换系统将以上的系统描述成有限个系统的切换系统。令  $\sigma(k) \in \Omega = \{0,1\}$  是一个基于时间的切换分段常数, 称为切换信号, 即当  $\sigma(k)$  取值不同时, 系统就相应变换成对应的子系统, 即:

$$\sigma(k) = 0 \Rightarrow S^{(0)} \quad \text{当前系统未出现丢包。}$$

$$\sigma(k) = 1 \Rightarrow S^{(1)} \quad \text{当前系统出现丢包。}$$

### 3.3 系统稳定性分析

对于上一章所给定的离散时间闭环切换系统模型, 本节将对证明其指数稳定, 并给出指数稳定的条件。

**定义 1** 若存在常数  $\alpha > 0$ ,  $0 < \gamma < 1$ , 在一定的切换信号  $\sigma(k)$  的作用下, 对于离散时间闭环切换系统模型(3-5), 能够使得对于任意有限的初始状态  $x(k_0)$  满足:  $\|x(k)\| \leq \alpha \gamma^{(k-k_0)} \|x(k_0)\|$ ,  $\forall k > k_0$ , 则称系统的平衡点  $x = 0$  在是切换信号作用下全局一致指数稳定的, 并且具有衰减率  $\gamma$ 。

**定义 2**<sup>[24]</sup> 对于任意的  $k_2 > k_1 \geq 0$ , 假设  $N_{\sigma_i}(k_2, k_1)$  为在时间段  $[k_1, k_2]$  内第  $i$  个子系统被激活的次数, 设  $T_i(k_2, k_1)$  为在时间段  $[k_1, k_2]$  内第  $i$  个子系统被激活的总时间周期数, 并且若存在  $\tau_{ai}$  使得:

$$N_{\sigma_i}(k_2, k_1) \leq N_{\sigma_i} + T_i(k_2, k_1) / \tau_{ai}$$

成立，则称  $\tau_{a_i}$  为系统切换信号的平均驻留时间。其中  $N_{\sigma}$  为系统的颤抖界。

对于图 3-1 的网络化控制系统，如第一章所提，若在网络传输时出现丢包，势必会影响系统性能，甚至破坏其稳定性。因为如第三章所提，为了更好地描述系统，可以将系统模型 (3-5) 按是否发生丢包分成两个子系统，即未出现丢包的子系统  $S^{(0)}$  和出现丢包的子系统  $S^{(1)}$ 。对于未发生丢包的子系统，可以通过设计合适的反馈控制器来使其系统状态能够那指数衰减；但是对于发生丢包的子系统，其系统状态很难严格满足指数衰减的要求。因此，本文主要工作及目的就是在满足一定丢包率的前提下，设计出合理的模型依赖的平均驻留时间以及反馈控制器增益  $K$ ，使得整个系统状态仍然能够满足全局一致指数稳定要求。

**引理 1**<sup>[25]</sup> 针对离散时间切换系统模型 (3-5)，给定常数  $\lambda_p$ ，假设存在  $C^1$  函数  $V_p(z(k)): R^n \rightarrow R$ ，以及  $\kappa_\infty$  类函数  $\kappa_1$ 、 $\kappa_2$ ，对于  $\forall p \in \Omega$ ，若有：

$$\kappa_1(\|m(k)\|) \leq V_p(m(k)) \leq \kappa_2(\|m(k)\|)$$

$$\Delta V_p(m(k)) < \lambda_p V_p(m(k))$$

并且对于  $\forall (\sigma(k_i) = p, \sigma(k_i^-) = q) \in \Omega \times \Omega$ ，且  $p \neq q$ ，若存在  $u_p \geq 1$ ，使得

$V_p(m(k)) < u_p V_q(m(k_i^-))$  成立，并且切换信号的模型依赖的平均驻留时间能够

同时满足：

$$\begin{cases} \tau_{a0} > \tau_{a0}^* = -\frac{\ln u_0}{\ln(1 + \lambda_0)} \quad (-1 < \lambda_0 < 0) \\ \tau_{a1} > \tau_{a1}^* \quad (\lambda_1 > 0, \forall \tau_{a1}^* > 0) \\ \frac{T^-}{T^+} > \frac{\ln \gamma^+ - \ln \gamma^*}{\ln \gamma^* - \ln \gamma^-} \quad (0 < \gamma^- < \gamma^* < 1) \end{cases} \quad (3-6)$$

式中， $\gamma^- = u_0^{\frac{1}{\tau_{a0}}} (1 + \lambda_0)$ ， $\gamma^+ = u_1^{\frac{1}{\tau_{a1}}} (1 + \lambda_1)$ ；而  $T^- = T_0(k, k_0)$ ， $T^+ = T_1(k, k_0)$  分别对应这未发生数据包丢失的子系统  $S^{(0)}$  和发生数据包丢失的子系统  $S^{(1)}$  的运行时间周期数的总和，那么就可以得到该离散时间切换系统 (3-5) 全局一致指数稳定，并且其指数衰减率为  $\gamma^*$ 。

**定理 1** 针对离散时间切换系统模型 (3-5)，给定

$u_p \geq 1$ ,  $p \in \Omega$ ,  $-1 < \lambda_0 < 0$ ,  $0 < \lambda_1 < 1$ , 如果存在对称矩阵  $P_p > 0$ ,  $P_q > 0$ ,  $\forall (p, q) \in \Omega \times \Omega$ ,  $p \neq q$ , 能使得下列不等式成立:

$$\tilde{\Phi}_p^T P_p \tilde{\Phi}_p - (1 + \lambda_p) P_p < 0 \quad (3-7)$$

$$P_p < u_p P_p \quad (3-8)$$

那么离散时间切换系统 (3-5) 是全局一致稳定的, 并且其基于切换信号的模型依赖平均驻留时间应满足式 (3-6)。

接下来, 将会对本文的离散时间切换系统 (3-5) 进行稳定性分析。

**证明** 令  $nT$  个时间周期中各个子系统的右连续切换点为时间序列  $k_0, k_1, k_2 \cdots k_i, k_{i+1} \cdots k_{N_\sigma(nT, 0)}$ 。

令  $V_p(m(k)) = m^T(k) P_p(m(k))$ ,  $P \in \Omega$  为子系统对应的 Lyapunov 函数,  $\lambda_p = 1 + \lambda_p$ ,  $p \in \Omega$ , 则对于  $k \in [k_i, k_{i+1}]$ , 通过反复利用式 (3-7) 和 (3-8), 有:

$$\begin{aligned} V_{\sigma(k_i)}(m(k)) &< \bar{\lambda}_{\sigma(k_i)}^{-(k-k_i)} V_{\sigma(k_i)}(m(k_i)) \\ &< \mu_{\sigma(k_i)} \bar{\lambda}_{\sigma(k_i)}^{-(k-k_i)} V_{\sigma(k_i^-)}(m(k_i^-)) \\ &< \mu_{\sigma(k_i)} \bar{\lambda}_{\sigma(k_{i-1})}^{-(k_i-k_{i-1})} V_{\sigma(k_{i-1})}(m(k_{i-1})) \\ &< \mu_{\sigma(k_i)} \mu_{\sigma(k_{i-1})} \bar{\lambda}_{\sigma(k_i)}^{-(k-k_i)} V_{\sigma(k_{i-1})}(m(k_{i-1}^-)) \\ &\quad \cdot \\ &\quad \cdot \\ &\quad \cdot \\ &< \prod_{s=1}^i \mu_{\sigma(k_s)} \bar{\lambda}_{\sigma(k_i)}^{-(k-k_i)} \bar{\lambda}_{\sigma(k_{i-1})}^{-(k_i-k_{i-1})} \cdots \bar{\lambda}_{\sigma(k_1)}^{-(k_2-k_1)} \times \bar{\lambda}_{\sigma(k_0)}^{-(k_1-k_0)} V_{\sigma(k_0)}(m(k_0)) \end{aligned}$$

令  $k_0 = 0$ ,  $V_{\sigma(k)}(m(k)) = V_{\sigma(k_i)}(m(k))$ , 并根据切换信号满足模型依赖下的平均驻留时间公式 (3-6), 则可以推出:

$$V_{\sigma(k)}(m(k)) < \mu_0^{N_{\sigma_0}(k, 0)} \mu_1^{N_{\sigma_1}(k, 0)} \times \bar{\lambda}_0^{-T_0(k, 0)} \bar{\lambda}_1^{-T_1(k, 0)} V_{\sigma(0)}(m(0)) \leq \mu_0^{N_{\sigma_0}(k, 0) + \frac{T_0(k, 0)}{\tau_{a0}}}$$

$$\begin{aligned} & \mu_1^{N_{01}(k,0)+\frac{T_1(k,0)}{\tau_{a1}}} \times \overline{\lambda_0}^{-T_0(k,0)} \overline{\lambda_1}^{-T_1(k,0)} V_{\sigma(0)}(m(0)) = \\ & \left( \begin{aligned} & \exp\left(\left|\sum_{p=0}^1 N_{0p} \ln \mu_p\right|\right) \left(\left|\mu_0^{\frac{1}{\tau_{a0}} \overline{\lambda_0}}\right|\right)^{T_0(k,0)} \\ & \times \left(\left|\mu_1^{\frac{1}{\tau_{a1}} \overline{\lambda_1}}\right|\right)^{T_1(k,0)} V_{\sigma(0)}(m(0)) \end{aligned} \right) = \\ & \exp\left(\left|\sum_{p=0}^1 N_{0p} \ln \mu_p\right|\right) \gamma^{-T^-} \gamma^{+T^+} V_{\sigma(0)}(m(0)) < \\ & \exp\left(\left|\sum_{p=0}^1 N_{0p} \ln \mu_p\right|\right) \gamma^{*k} V_{\sigma(0)}(m(0)) \end{aligned}$$

令  $\beta_1 = \min_{\forall z \in \Omega} \lambda_{\min}(P_z)$ ,  $\beta_2 = \max_{\forall z \in \Omega} \lambda_{\max}(P_z)$ , 可以得到:

$$\begin{aligned} \beta_1 \|m(k)\| & \leq V_{\sigma(k)}(m(k)) < \exp\left(\left|\sum_{p=0}^1 N_{0p} \ln \mu_p\right|\right) \gamma^{*k} V_{\sigma(k_0)}(m(0)) < \\ & \exp\left(\left|\sum_{p=0}^1 N_{0p} \ln \mu_p\right|\right) \gamma^{*k} \cdot \beta_2 \|m(0)\| \\ \text{令 } \alpha & = \frac{\exp\left(\left|\sum_{p=1}^N N_{0p} \ln \mu_p\right|\right) \beta_2}{\beta_1}, \text{ 则 } \|m(k)\| \leq \alpha \gamma^{*k} \|m(0)\|. \end{aligned}$$

假设初始时刻控制器  $u(-1) = 0$ , 得到:

$$\|x(k)\| \leq \|m(k)\| \leq \alpha \gamma^{*k} \|m(0)\| = \alpha \gamma^{*k} \|x(0)\|$$

即证得满足定义 1。

当指数衰减率  $\gamma^* < 1$ , 即满足不等式 (3-6) 时, 系统指数稳定。证明完毕。

### 3.4 系统控制器设计及调度方案设计

上一节已经证明了当指数衰减率  $\gamma^* < 1$  时, 系统满足全局一致指数稳定, 因此本节将会完成系统控制器的设计以及调度方案的设计。

## 3.4.1 控制器设计

**引理 2 (Schur 补引理)** 假设存在矩阵  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$ ，其中， $S_2^T = S_2 > 0$ ， $S_3^T = S_3$ ，则有  $S_1^T S_2 S_1 + S_3 < 0$  成立等价于：

$$\begin{bmatrix} -S_2^{-1} & S_1 \\ S_1^T & S_3 \end{bmatrix} < 0 \text{ 或 } \begin{bmatrix} S_3 & S_1^T \\ S_1 & -S_2^{-1} \end{bmatrix} < 0$$

**引理 3** 当给定具有特定维数的矩阵  $D$ 、 $E$ 、 $W$ ，其中， $W$  是对称矩阵，对于满足  $F^T F < I$  的所有矩阵  $F$ ，有  $W + DFE + E^T F^T D^T < 0$ ，并且，当且仅当存在  $\varepsilon > 0$  时，使得  $W + \varepsilon DD^T + \varepsilon^{-1} E^T E < 0$ 。

**定理 2** 如果存在  $u_p \geq 1$ ， $p \in \Omega$ ， $-1 < \lambda_0 < 0$ ， $0 < \lambda_1 < 1$ ，对于离散时间切换系统模型 (3-5)，若是存在一个  $Y_0$  和  $\varepsilon > 0$ ，以及  $X_p = X_p^T > 0$ ， $p \in \Omega$  满足以下的线性矩阵不等式 (LMIs)：

$$\begin{bmatrix} -(1+\lambda_p)X_p & * & * \\ \hat{\Phi}_p X_p + \hat{\Gamma} Y_p & \varepsilon \hat{D} \hat{D}^T - X_p & * \\ \hat{E}_0 X_p + E Y_p & 0 & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0, \quad p=0 \quad (3-9)$$

$$\begin{bmatrix} -(1+\lambda_p)X_p & * \\ \bar{\Phi}_p X_p & -X_p \end{bmatrix} < 0, \quad p=1 \quad (3-10)$$

$$\begin{bmatrix} -u_p X_q & * \\ X_q & -X_p \end{bmatrix} < 0, \quad \forall p \neq q \in \Omega \quad (3-11)$$

并且，切换信号能够满足模型依赖的平均驻留时间公式 (3-6)，则可以得出系统全局一致指数稳定，此时系统的状态反馈增益为  $K = Y_0 X_0^{-1}$ 。由此，就可以得出系统的控制器  $u(k)$ ，完成了系统控制器的设计。

下面将对定理 2 进行证明。

**证明** 首先使用引理 2 对不等式 (3-7) 和 (3-8) 进行等效变换得：

$$\begin{bmatrix} -(1+\lambda_p)P_p & \tilde{\Phi}_p^T \\ \tilde{\Phi}_p & -P_p^{-1} \end{bmatrix} < 0, \quad \forall p \in \Omega \quad (3-12)$$

$$\begin{bmatrix} -u_p X_p & I \\ I & -P_p^{-1} \end{bmatrix} < 0, \quad \forall p \neq q \in \Omega \quad (3-13)$$

再令  $X_p = P_p^{-1}$ ,  $X_q = P_q^{-1}$ ,  $p, q \in \Omega$ , 分别对式 (3-12) 左右两边乘上  $\text{diag}(X_p, I)$  以及式 (3-13) 左右两边乘上  $\text{diag}(X_q, I)$ , 从而得到:

$$\begin{bmatrix} -(1+\lambda_p)X_p & (\tilde{\Phi}_p X_p)^T \\ \tilde{\Phi}_p X_p & -X_p \end{bmatrix} < 0, \quad \forall p \in \Omega \quad (3-14)$$

$$\begin{bmatrix} -u_p X_p & * \\ X_q & -X_p \end{bmatrix} < 0, \quad \forall p \neq q \in \Omega \quad (3-15)$$

对于  $p=1$ , 表示系统在数据传输的过程中发生了数据包丢失, 根据前文所建立的系统模型, 有  $\tilde{\Phi}_1 = \bar{\Phi}_1$ , 由此, 可以从式 (3-14) 和 (3-15) 得到式 (3-10) 和 (3-11)。

对于  $p=0$ , 表示系统在数据传输的过程中未发生数据包丢失, 虽然系统未发生丢包, 但是在传输过程中产生了随机传输时延, 从式 (3-14) 可得:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -(1+\lambda_p)X_p & * \\ \tilde{\Phi}_p X_p + \hat{\Gamma} Y_p & -X_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{D} \end{bmatrix} F(\tau'_k) [\hat{E}_0 X_p + E Y_p \quad 0] + \\ & [\hat{E}_0 X_p + E Y_p \quad 0]^T F^T(\tau'_k) \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{D} \end{bmatrix}^T < 0 \end{aligned} \quad (3-16)$$

式中,  $Y_p = KX_p$ 。

又因为  $F^T(\tau'_k)F(\tau'_k) < I$ , 根据引理 3, 上式可等效为

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -(1+\lambda_p)X_p & * \\ \tilde{\Phi}_p X_p + \hat{\Gamma} Y_p & -X_p \end{bmatrix} + \varepsilon \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \hat{D}^T \end{bmatrix} + \\ & \varepsilon^{-1} \begin{bmatrix} (\hat{E}_0 X_p + E Y_p)^T \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{E}_0 X_p + E Y_p & 0 \end{bmatrix} < 0 \end{aligned} \quad (3-17)$$

再次采用引理 2, 可证明式 (3-17) 和 (3-9) 是等效的。证明完毕。

由上述得出系统控制器  $u(k) = km(k)$ , 其中  $k = Y_0 X_0^{-1}$ 。



### 3.4.2 调度方案设计

首先给出一个推论：

**推论 1** 若存在  $-1 < \lambda_0 < 0$ ,  $0 < \lambda_1 < 1$ , 针对离散时间闭环切换系统模型 (3-5), 选择一个合适的  $\mu$ , 使其满足：

$$u_p = \mu < 1/(1 + \lambda_0), \quad p \in \Omega \quad (3-18)$$

假设存在  $Y_0$ 、 $X_p = X_p^T > 0$ ,  $p \in \Omega$ , 以及  $\varepsilon > 0$  满足不等式 LMIs ((3-9)-(3-11)), 则可以得到其指数衰减率  $\gamma^*$  与丢包率  $\beta$  的关系为

$$\beta < \beta^* = a \ln \gamma^* - b \quad (3-19)$$

式中,  $a = \frac{1}{\ln((1 + \lambda_1)/(1 + \lambda_0))}$ ,  $b = \frac{\ln(\mu(1 + \lambda_0))}{\ln((1 + \lambda_1)/(1 + \lambda_0))}$ 。

**证明** 对于实际的离散时间切换系统模型 (3-5), 考虑其每个子系统的平均驻留时间必然有  $\tau_{ap} > 1$ ,  $p \in \Omega$ 。然后根据式 (3-6) 中每个子系统的平均驻留时间的要求, 当选择  $\mu = u_p < 1/(1 + \lambda_0)$ , 可以得出  $\tau_{a0}^* < 1$ 。可以看出无论系统怎样发生切换跳变, 其平均驻留时间均是符合要求的。于是, 对式 (3-6) 中第 3 个不等式进行等价变换:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{T^+ + T^-}{T^+} = \frac{T^-}{T^+} + 1 > \frac{\ln \gamma^+ - \ln \gamma^-}{\ln \gamma^* - \ln \gamma^-}$$

式中,  $0 < \gamma^- \leq u(1 + \lambda_0) < 1$ ,  $1 < \gamma^+ \leq u(1 + \lambda_1)$ 。

于是, 可以得到系统的丢包率和指数衰减率的关系为

$$\beta = \frac{\ln \gamma^+ - \ln \gamma^-}{\ln \gamma^* - \ln \gamma^-} < \beta^* = a \ln \gamma^* - b$$

证明完毕。

由于在 3.1 节中已经得出了使得系统指数稳定, 指数衰减率所需要满足的范围, 并且提高传感器发射功率可以降低丢包率。因此设计出本文的调度方案, 即根据指数衰减率的要求, 提高传感器的发射功率, 从而减低系统丢包率, 并使得指数衰减率降低到一定范围内, 使得系统满足全局一致指数稳定。

### 3.5 数值算例仿真

**算例** 针对以下连续时间控制对象的状态空间方程模型：

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 \\ 0.12 & -0.15 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.1 \end{bmatrix} u(t) \quad (3-21)$$

因为系数矩阵  $A$  的特征值分别为 0.1741 和 -0.2241，不全为负数，因此系统是开环不稳定的。给定系统初始状态  $x(0) = [0.5 \quad -0.5]^T$ ，并选取传感器的采样周期  $T = 1s$ ，由 3.1 节得知随机网络诱导时延  $\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^{ca} < T$ 。同时给定满足引理 3 条件的  $\sigma = 0.53$ ，给定合适的参数  $\mu = 1.05$ ， $\lambda_0 = -0.293$ ， $\lambda_1 = 0.998$ ，对线性矩阵不等式 (3-9) — (3-11) 用 Matlab 的 LMI 工具箱进行求解，得到控制器增益的可行解为  $K = [21.4665 \quad 20.1363 \quad 4.5516]$ ，并且丢包率允许上限与系统指数衰减率下限的相应关系，见表 3-1。

表 3-1 对象 (3-21) 丢包率允许上限与系统指数衰减率下限的关系

$\beta^* / \%$	0	7	12	18	25	30
$\gamma^*$	0.742	0.798	0.841	0.895	0.963	1.014

于是，利用 Matlab 仿真，可以得到任意随机丢包率为 30% 的时间序列，其中 1 表示发生丢包，0 表示未发生丢包，如图 3-3 所示。

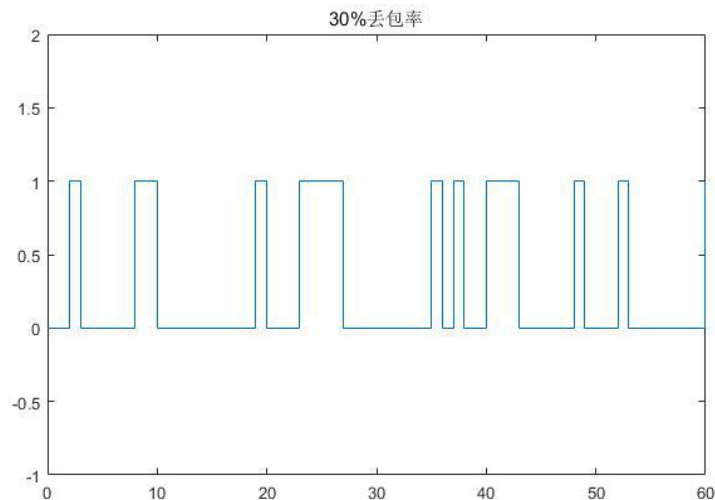


图 3-3 系统随机丢包率为 30% 的时序图

在该丢包率的情况下，得到系统的状态轨迹图，并与线性二次最优控制（LQR）算法进行对比，对比如图 3-4 和 3-5。

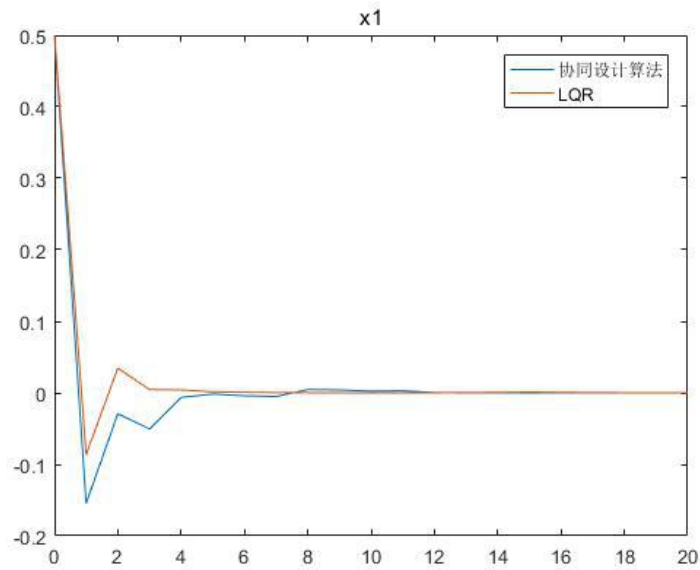


图 3-4 随机丢包率为 30%的状态轨迹与 LQR 算法 x1 对比图

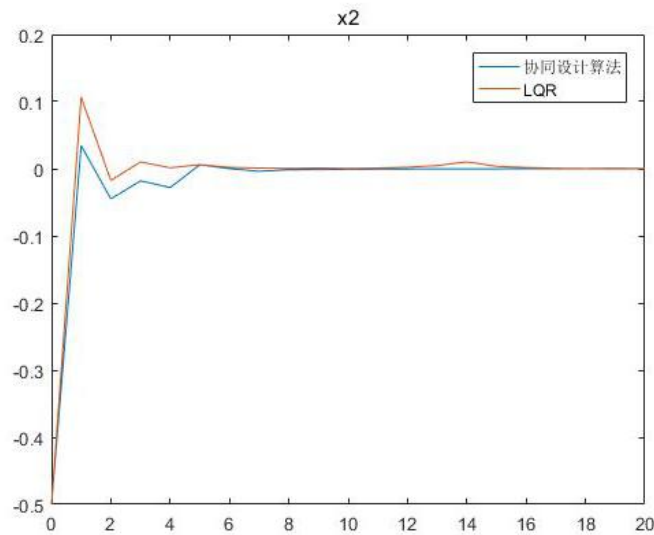


图 3-5 随机丢包率为 30%的状态轨迹与 LQR 算法 x2 对比图

LQR 理论是一种现代控制理论中发展最早也最为成熟的状态空间设计法，值得一提的是，LQR 可获得状态线性反馈的最优控制规律，易于形成闭环最优控制。从图 3-4 和 3-5 中可以看出，针对一个连续时间控制对象，本文所提出的

方法能够得到一个比 LQR 更好的结果，验证了本文所提方法的有效性。

### 3.6 本章小结

本章首先对所研究的具有时延和丢包的网络化控制系统的协同设计进行了问题描述，对所研究问题进行了分析和假设。接着，对系统进行模型建立，描述了与模型相关的切换系统，然后将系统是否丢包作为切换信号，建立了一个切换系统模型，并给出基于增广矩阵信息的反馈控制器，得出了系统的离散时间切换系统模型，完成了模型的建立。与文献[23]类似，本文所引入的增广矩阵不仅包含执行器的控制信息，还包含系统控制对象的状态信息。但是，本文在此基础上还给出了所研究系统的反馈控制器，控制器的提出使得本文所提出的系统切换模型能够较为直接地反映出系统具有时延和丢包的情形，更加具备研究对象的特征。接着进一步对系统进行稳定性分析，给出使得系统状态满足指数稳定的条件，并且还给出了系统状态指数衰减率与任意丢包率的定量关系，还提出了相应的调度方案。最后，利用 LMI 工具箱计算出状态反馈增益  $K$ ，并且对开环不稳定的控制系统进行数值仿真以及与 LQR 方法进行对比，验证本文所提方法的有效性。

## 第 4 章 总结与展望

### 4.1 毕设工作总结

随着信息化时代的发展,在这个工业 4.0 的时代,网络化控制系统的研究与发展变得日益重要。网络化控制系统中传感器,控制器和执行器之间的信息传输往往通过数据通信网络进行,这使得网络化控制系统有了灵活性高,成本低和后期维护简单等优点。而协同设计的优势在于将网络资源限制、空间限制等更多的网络因素融入到控制系统设计和性能优化中,在设计控制系统的同时考虑网络实现的问题,从而优化系统的总体性能,达到资源共享、快速协调沟通、不受时间空间限制的目的。因此,网络化控制的协同算法设计以及如何处理网络诱导时延等问题成为网络化控制系统研究的关键点,受到了广泛的关注。

本文的研究内容是基于网络化控制的协同设计算法,主要针对研究合适的网络调度方案,了解现有的路由协议,同时从解决时延丢包两个角度设计控制算法。论文的主要工作如下:

1) 查阅相关文献资料,综述课题研究背景与意义,介绍了相关通信协议和调度算法以及网络化控制系统以及器协同设计算法的研究现状,并详细说明了现有关于解决 NCSs 中时延和丢包问题的协同设计算法。

2) 基于模型依赖的平均驻留时间的切换系统的分析方法,本文针对具有时延和丢包的网络化控制系统,采用增广矩阵的方法建立了离散时间系统模型。

3) 针对系统进行了状态稳定性分析,给出了系统状态满足全局一致指数稳定的条件。

4) 设计了系统的状态反馈控制器和调度方案,并定量描述了系统指数衰减率和系统任意丢包率的关系。

5) 利用 LMI 工具箱计算出状态反馈增益  $K$ ,并通过对开环不稳定的控制对象进行数值仿真以及与 LQR 方法进行对比,验证了本文所提方法的有效性。

### 4.2 未来展望

本文简单通过综合目前现领域的各文献进行了叙述,介绍了关于网络化控制

系统的协同设计算法。各研究领域实现远程交互和复杂控制都需以网络化控制为前提，并且在传感器、执行机构以及驱动装置等设备日益智能化的同时，通信网络也得到了更加深层次的应用。不仅在控制策略上，网络化控制系统的性能与网络资源的合理分配及使用也有相关性。因此，为了同时保证系统的控制质量和网络的服务质量，网络化控制系统的全局性能优化产生了，这是一种折中的产物。基于网络化控制系统的协同设计是系统全局性能优化的一个有效途径。随着 NCSs 研究的不断深入和发展，如何合理调度和分配网络资源从而提升网络化控制系统的性能越来越受到人们的关注。

## 参 考 文 献

- [1] 王岩, 孙增圻. 网络控制系统分析与设计[M]. 清华大学出版社, 2009.
- [2] Yang, T. C . Networked control system: a brief survey[J]. IEE Proceedings Control Theory and Applications, 2006, 153(4):403-412.
- [3] 陈磊. 从现场总线到工业以太网的实时性问题研究[D]. 浙江大学, 2004.
- [4] 冯晓东. 基于工业以太网的网络控制系统及其应用[D]. 2003. 卞正岗. 温度的测量和控制综述[N]. PLC&FA, 2011-4.
- [5] Zhang W. Stability analysis of networked control systems[D]. Cleveland: Case Western Reserve University, 2001.
- [6] Ray A, Halevi Y. Integrated communication and control systems: Part I-analysis and part II-design considerations[J]. Journal of dynamic systems, measurement, and Control, 1988, 110(4):367~381.
- [7] Cervin A, Henriksson D, Lincoln B, et al. How does control timing affect Performance? Analysis and simulation of timing using jitterbug and truetime[J]. IEEE control systems, 2003, 23(3):16-30.
- [8] Feng X, Zhi W, Sun Y. Simulation based performance analysis of networked control systems with resource constraints[C]// Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2004.
- [9] Marti P, Yopez J, Velasco M, et al. Managing quality-of-control in network-based control systems by controller and message scheduling co-design[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(6):1159-1167.
- [10] Nilsson J. Real-time control systems with delays[D]. Sweden: Lund Institute of Technology, 1998.
- [11] 江兵, 张崇巍. 具有时变时延和丢包的网络控制系统  $H^\infty$  优化控制[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(7):1501-1505..
- [12] 樊卫华, 谢蓉华, 陈庆伟. 具有丢包的短时延网络控制系统的建模与分析[C] // 中国智能自动化学术会议. 2011.

- [13] Hassibi A, Boyd S P, How J P. Control of asynchronous dynamical systems with rate constraints on events[C]// IEEE Conference on Decision & Control. 1999.
- [14] Bu X H, Hou Z S. Stability of iterative learning control with data dropouts via Asynchronous Dynamical System[J]. 国际自动化与计算杂志(英文版), 2011, 08(1):29-36.
- [15] Rabello A, Bhaya A. Stability of asynchronous dynamical systems with rate constraints and applications[J]. Control Theory and Applications, IEE Proceedings -, 2003, 150(5):546-50.
- [16] Long, WANG, Guang Ming. A switched system approach to stabilization of networked control systems[J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2011, 21(17):1925-1946.
- [17] Wang R, Liu G P, Wang W, et al.  $H^\infty$  control for networked predictive control systems based on the switched Lyapunov function method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(10):3565-3571.
- [18] Sun Y, Qin S. Stability of networked control systems with packet dropout: an average dwell time approach[J]. IET Control Theory and Applications, 2011, 5(1):47-53.
- [19] Zhang W A, Yu L. Modeling and control of networked control systems with both network-induced delay and packet-dropout[J]. Automatica, 2008, 44(12): 3206-3210.
- [20] Wang J F, Yang H Z. H control of a class of networked control systems with time delay and packet dropout[J]. Applied Mathematics and Computation, 2011, 217(18): 7469-7477.
- [21] Liu C L, Layland J W. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment[M]// Readings in hardware/software co-design. 2001.
- [22] Lian F L, Moyne J, Tilbury D. Analysis and modeling of networked control systems: MIMO case with multiple time delays[J]. 2001.



- [23] Wang J, Yang H. Exponential stability of a class of networked control systems with time delays and packet dropouts[J]. *Applied Mathematics & Computation*, 2012, 218(17):8887-8894.
- [24] 刘义才, 刘斌. 具有时延和丢包的网络化切换系统控制研究[J]. *控制工程*, 2018, 25(8).
- [25] Zhang H, Xie D, Zhang H, et al. Stability analysis for discrete-time switched systems with unstable subsystems by a mode-dependent average dwell time approach.[J]. *Isa Transactions*, 2014, 53(4):1081-1086.

## 附录：LMI 求解及仿真程序

```
#####  
# designer:吴利男  
clear all;  
  
%LMI 求解部分  
  
%以下为各参数矩阵计算  
  
A=[0.1 0.2;0.12 -0.15]; %状态空间方程写入  
B=[0.2;0.1]; %状态空间方程写入  
  
T=1;  
  
t=0.8;  
  
sigma=0.16;  
  
lambada0=-0.307;  
  
lambada1=0.995;  
  
U=1.05;  
  
I=eye(1);  
  
E=B;  
  
syms s  
  
gamma0=int(exp(A*s),0,0.3-t)*B;  
gamma1=int(exp(A*s),0.3-t,0.3)*B;  
gamma2=int(exp(A*s),0,0.3)*B;  
  
gamma00=[gamma0;I];  
gamma=[gamma0;I];  
  
phi=exp(A*T);  
  
phi0=[phi,gamma1;0 0 0];  
phi1=[phi,gamma2;0 0 1];  
  
E0=[zeros(2),-E];  
  
D=sigma*exp(A*T/2);  
  
D1=[D;0 0];
```

```
%LMI 三个不等式写入
setlmis([]);
X0=lmivar(1,[3,1]);%3*3
X1=lmivar(1,[3,1]);
Y0=lmivar(2,[1,3]);%1*3
epsilon=lmivar(1,[1,1]);

%添加不等式 1
lmiterm([1 1 1 X0],[-(1+lambada0),1);
lmiterm([1 2 1 X0],phi0,1);
lmiterm([1 2 1 Y0],gamma,1);
lmiterm([1 2 2 epsilon],1,D1*D1');
lmiterm([1 2 2 X0],-1,1);
lmiterm([1 3 1 X0],E0,1);
lmiterm([1 3 1 Y0],E,1);
lmiterm([1 3 2 0],0);
lmiterm([1 3 3 epsilon],-1,I);
%添加不等式 2
lmiterm([2 1 1 X1],[-(1+lambada1),1);
lmiterm([2 2 1 X1],phi1,1);
lmiterm([2 2 2 X1],-1,1);
%添加不等式 3
lmiterm([3 1 1 X0],-U,1);
lmiterm([3 2 1 X0],1,1);
lmiterm([3 2 2 X1],-1,1);
%添加不等式 4
lmiterm([4 1 1 X1],-U,1);
lmiterm([4 2 1 X1],1,1);
lmiterm([4 2 2 X0],-1,1);
```

```

%求解 LMI

lmisys=getlmis;

[tmin,xfeas]=feasp(lmisys);

X00=dec2mat(lmisys,xfeas,X0);

Y00=dec2mat(lmisys,xfeas,Y0);

%状态反馈增益 K

K=Y00*X00^-1;

%仿真部分

%迭代求状态轨迹部分

n=20;%20 步

p=0.3;%丢包率为 30%

x0=[0.5 -0.5]';%初始状态

x(:,1)=x0;%数字第一列为 x0

z(:,1)=[x0;0];

x_p(:,1)=0;

for k=1:n

    if rand(1,1) > p %随机生成一个 (0, 1) 之间的数

        rsc(:,k) = 0;%未丢包

    else

        rsc(:,k) = 1;%丢包

    end

    x_p(:,k+1)=rsc(:,k);

%-----状态迭代部分-----

    if rsc(:,k)==1 %发生丢包了

        z(:,k+1)=phi1*z(:,k);

    else %成功发送了

        z(:,k+1)=phi0*z(:,k)+gamma00*K*z(:,k);

```

```

end

%-----

end

%和 LQR 进行对比
B2=[exp(1/5)/2 + 2*exp(1/10) - 5/2;(5*exp(3/25))/3 - (2*exp(-3/20))/3 - 1];
Q2=eye(2);%这两个是对比 LQR
R2=eye(1);
[K2,S2,E2] = dlqr(phi,B2,Q2,R2);
K2=-K2;
for k=1:n
    if rand(1,1) > p %随机生成一个 (0, 1) 之间的数
        rsc(:,k) = 0;%未丢包
    else
        rsc(:,k) = 1;%丢包
    end
%-----状态迭代部分-----
    if rsc(:,k)==1 %发生丢包了
        x(:,k+1)=phi*x(:,k);
    else %成功发送了
        x(:,k+1)=phi*x(:,k)+B2*K2*x(:,k);
    end
end

end

%画对比图
t=0:n;
figure(1);
plot(t,z(1,:));
hold on;
plot(t,x(1,:));

```

```
title('x1');  
legend('协同设计算法','LQR');  
figure(2);  
plot(t,z(2,:));  
hold on;  
plot(t,x(2,:));  
title('x2');  
legend('协同设计算法','LQR');  
%画时序图  
t=0:n;  
figure(3);  
stairs(t,x_p(1,:));  
title('30%丢包率');
```

## 致 谢

四年大学生活，犹如白驹过隙，一转眼就到了即将走上社会的年纪。作为人生中不可或缺的四年来，在这一路上，不仅有柴米油盐，更有酸甜苦辣。在这里，我由衷地想对陪我走过这四年的老师，同学表示感谢。

首先，我要感谢我的母校浙江工业大学，从当初高考高分选择进入浙江工业大学健行学院，一直有人质疑我的选择，可是我一直热爱我的母校。她给我们设计了很好的培养方案，一直以来给我们提高最优质的学习与科研环境，是我们从稚嫩走向成熟的呵护人。

然后，在这里我要感谢我的指导教师赵云波教授。还记得最初认识赵老师是他为我们班上线性代数课，从那时候开始，赵老师在我心里就留下了一个非常好的印象。并且在大二选择导师的时候，我选择了赵老师。赵老师一直以严谨的治学态度教诲我。从一开始的选题直到最终的毕业论文的完成，赵云波老师一直在用自己的所能提供的最大努力给予我帮助。每次遇到困难，总是在与赵老师的交流下，赵老师通过不断地指导，使得我顺利迈过困难，最终完成了毕业设计。再次感谢赵老师。

最后，我想特别感谢的是我的父母。大学四年是远离父母的四年，因为回家路上花的时间久，在大学期间，我只有在寒暑假才会回家。父母还是经常通过微信，电话等方式关心我，问我学习，生活怎么样？钱够不够用？我一直能感受到父母的爱，也会用自己一辈子来报答。再次感谢我的父母。

我一直认为大学不仅是学习知识的四年，更是学习做好一个人的四年，很高兴，我完成了这四年。接下来，我即将走上工作岗位，我还是会继续像在学校中一样虚心向学，热心为人，成为更好的自己！