

上海师范大学

本科毕业论文(设计)

题目(中文): 具有网络诱导时延的控制系统分析及控制器设计

(英文): Control system analysis and controller design
with network induced delay.

学 院 信息与机电工程学院

年级专业 14 级电气工程及其自动化

学生姓名 肖帅衡

学 号 140154042

指导教师 朱燕飞

完 成 日 期 年 月

上海师范大学本科毕业论文（设计）

诚信声明

本人郑重声明：所呈交的毕业论文（设计），题目《具有网络诱导时延的控制系统分析及控制器设计》是本人在指导教师的指导下，进行研究工作所取得的成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。除此之外，本论文（设计）不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。本人完全意识到本声明应承担的法律责任。

作者签名：

日期： 年 月 日

上海师范大学本科毕业论文（设计）选题登记表

学生姓名	肖帅衡	学号	140154042	专业	电气工程及其自动化
学院	信息与机电工程学院	指导教师姓名/职称		朱燕飞/讲师	
题目	具有网络诱导时延的控制系统分析及控制器设计				
<p>本选题的意义及国内外发展简况：</p> <p>网络化控制系统作为网络发展的衍生物之一，由于网络的带宽有限，容易导致网络中负荷多并且发生堵塞现象，因此发生数据包在传输过程中发生排队等待的现象，从而产生数据传输的延迟。解决此问题使得网络控制减小甚至消除时延现象，让数据传输更加流畅，提高控制的精度。</p> <p>近年来人们对网络控制系统中存在的问题进行了大量深入仔细的科学研究，取得了一系列的成果，尤其表现在网络诱导时延，控制系统建模，稳定性与控制器设计，丢包等问题上。其中单独对网络诱导时延的研究成果比较少。</p>					
<p>研究内容：</p> <p>主要研究 NCS 中时延对系统稳定性的影响，设计合适的控制器确保系统能够稳定，并且研究时延变化时对系统性能的影响。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 针对短时延 NCS，在稳定性分析的基础上，通过验证稳定性分析结果中的 LMI 的可行性给出时延上界的一种求解策略。 2. 针对时延非整数倍采样周期的长时延 NCS，给出了一种建模思想，设计了输出反馈延时补偿器，并进行了稳定性分析。 					
<p>研究方法、手段及步骤：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 对目前阶段国内外的网络诱导时延问题进行总结，找出现在技术中存在的问题。 2. 查阅国内外资料并加以分类总结， 3. 针对网络控制系统中存在的网络诱导时延情况，运用李雅普诺夫第二理论分析。 4. 通过线性矩阵不等式方法对时延网络控制系统进行控制器的设计和稳定性 					

分析。
5. 使用仿真软件进行仿真，验证猜想。

- 主要参考文献：
- [1] 杨淞迪, 基于时延和丢包网络控制系统的容错控制研究[D]. 沈阳工业大学 2017.
- [2] 白爽. 基于网络的控制系统稳定性分析 [D]. 华北电力大学 2016.
- [3] 张政. 网络控制系统时延分析与补偿控制研究[D]. 昆明理工大学 2015.
- [4] 胡松钰, 吴伟, 钱松, 潘剑飞, 邱丽. 具有网络时延的直线开关磁阻电机位置跟踪控制[J]. 深圳大学学报 (理工版), 2017 年, (4): 434-440.
- [5] 魏宇. 基于切换系统处理方法的网络化控制系统稳定性分析 [J]. 太原科技大学 2015.
- [6] 伍德鹏. 网络控制系统的稳定性及量化影响分析[D]. 杭州电子科技大学 2015.

时间进度:	
2017 年 10 月;	布置毕业论文和说明要求、学习选题。

2017 年 11 月 18 日前;	完成选题和填写“选题登记表”
--------------------	----------------

2017 年 11 月 11 日---12 月 10 日; 搜索资料, 阅读, 系统分析与设计。

2017 年 12 月 1 日---2018 年 1 月系统实现,提交论文大纲,完成论文初稿。

2018 年 2 月底前	系统测试，完成论文修改稿。
--------------	---------------

2018 年 3 月底前	进一步完善系统,论文最终定稿。
--------------	-----------------

学生肖帅衡（签名） 2017 年 12 月 01 日

指导教师意见:

指导教师_____ (签名) 年 月 日

专业负责人意见：

专业负责人_____（签名） 年 月 日

上海师范大学毕业论文（设计）指导记录表

学院：信息与机电工程学院

专业	电气工程及其自动化	指导教师	朱燕飞	学生姓名	肖帅衡	学号	140154042
毕业论文(设计)题目		基于网络控制中时延问题的稳定性分析					
日期	指导内容		存在的问题与进一步改进的意见			教师签名	学生签名
2017.11.05	在老师指导下进行选题并填表		论文标题不够细致与准确				
2017.11.20	老师帮助查阅资料并讲解		部分专业上知识不够，老师给予讲解				
2017.12.01	提交论文大纲		论文大纲逻辑部分错误				
2017.12.29	提交论文初稿		文章不够充实，部分知识有误区				
2018.02.20	论文定稿		论文较合格，需强化细节				

摘要

网络化控制系统作为网络发展的衍生物之一，由于网络的带宽有限，容易导致网络中负荷多并且发生堵塞现象，因此发生数据包在传输过程中发生排队等待的现象，从而产生数据传输的延迟。解决此问题使得网络控制减小甚至消除时延现象，让数据传输更加流畅，提高控制的精度。

基于网络控制系统的研究是当下控制领域研究的一个非常热门的问题，随着计算机网络、控制系统以及通信技术的快速发展和互相渗透，控制系统的结构愈来愈复杂，在空间中的分布愈来愈广泛，因此对系统的控制性能的要求也愈来愈高。

本文为了解决此问题，分为六章简明的介绍了在 NCS 中产生时延的现象及其产生原因并解决针对网络化控制系统中存在固定时延和随机时延的问题，并加以设计相应的控制器，最后运用 MATLAB 仿真软件进行仿真，验证猜想。

关键词：网络化控制系统；时延；lyapunov 稳定性理论；
MATLAB

Abstract

The networked control system is one of the derivatives of the network development. Since the bandwidth of the network is limited, the load in the network is likely to be large and congestion occurs. Therefore, the phenomenon that the data packets are queued during the transmission occurs, resulting in the delay of data transmission. . Solving this problem makes the network control reduce or even eliminate the delay phenomenon, make the data transmission more smooth, and improve the control accuracy.

Research based on network control systems is a very hot issue in the current control field. With the rapid development and mutual penetration of computer networks, control systems, and communication technologies, the structure of control systems is becoming more and more complex, and the distribution in space is becoming more and more complex. The more extensive, the more demanding the control performance of the system is.

In order to solve this problem, this paper is divided into six chapters to briefly introduce the phenomenon of delay and its causes in NCS and solve the problems of fixed delay and random delay in networked control systems. The controller finally uses MATLAB

simulation software to simulate and verify the conjecture.

Key words: Networked control system; time delay; lyapunov
stability theory; MABLAB

目录

上海师范大学本科毕业论文（设计）	II
诚信声明	II
上海师范大学本科毕业论文（设计）选题登记表	III
上海师范大学毕业论文（设计）指导记录表	V
摘要	VI
Abstract.....	VII
1 绪论	1
1.1 课题研究背景	1
1.2 国内外研究现状	1
1.3 网络控制系统的基本问题	3
1.3.1 网络控制系统	3
1.3.2 网络化控制系统的分类	4
1.3.3 网络诱导时延	5
1.4 网络控制系统时延特性	5
1.5 本文的主要工作	6
2 预备知识介绍	7
2.1 NCS 网络诱导时延模型	7
2.2 Lyapunov 稳定性理论	9
2.3 线性矩阵不等式理论	10
2.3.1 LMI 与控制化系统性能指标关系	11
2.4 MATLAB 仿真软件	12
3. 网络控制化系统的采样技术	12
3.1 同步采样	12
3.2 非同步采样	12
3.3 时间驱动方式	13
3.4 事件驱动方式	14
4. 具有固定时延的网络化控制系统控制器设计	15
4.1 缓冲区的设立	15

4.2 补偿器的设计	16
4.3 Kalman 滤波理论	17
4.3.1 信号模型	17
4.3.2 算法原理	17
5. 具有随机时延的网络控制化系统控制器设计	18
5.1 根据时延统计规律设计控制器	18
5.2 补偿器的设计	20
6. MATLAB 仿真	22
6.1 truetype 工具箱	22
6.2 参数设定	23
6.2 仿真结果	28
参考文献	29
致谢	31

1 绪论

1.1 课题研究背景

随着科技的发展，互联网在人们的生活中越来越普及。我们可以在互联网上查阅资料、学习、工作、聊天等，互联网在给我们生活带来很大方便。

网络系统是互联网重要组成部分，在互联网中起着不可或缺的作用，它赋予互联网新的生命，是一种很厉害的操作系统（可以向互联网提供周全的服务），网络系统服务于互联网，增加了一种很厉害的能力为计算机操作系统。

网络控制系统作为网络开发的衍生工具之一，由于网络带宽有限，容易造成网络负载和堵塞现象，因此在传输过程中发生分组排队现象，导致数据传输延迟。解决减少甚至消除延时网络控制现象的问题，使数据传输更加顺畅，提高控制精度。

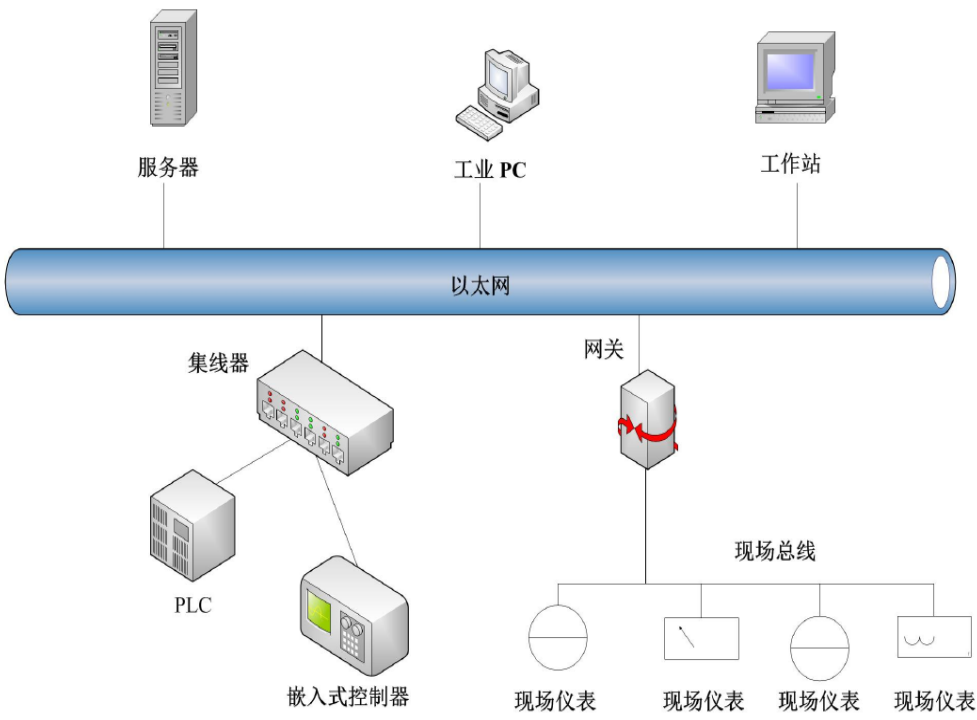
近年来对网络控制系统中存在的大量问题进行了深入细致的研究，取得了一系列成果，特别是在网络诱发延迟，控制系统建模，稳定性和控制器设计等丢包问题方面。单独研究网络控制化系统中的网络诱导时延的项目较少。

1.2 国内外研究现状

研究网络化控制系统（NCS）是当下控制领域研究的一个非常热门的问题，随着计算机网络、控制系统以及通信技术的快速发展和互相渗透，控制系统的结构愈来愈复杂，在空间中的分布愈来愈广泛，因此对系统的控制性能的要求也愈来愈高。

NCS 的概念最早出现在马里兰大学 G.C.Walsh 1998 年的研究中，Walsh 指出 NCS 中会形成闭环结构由各元器部件之间的串行通讯。伴随着计算机网络的普遍运用和科技的疾速发展，控制体系的结构组成发生了巨大的改

变，NCS 应运而生，系统中各个基本部件之间经过网络进行衔接，信息以及数据也在网络中交替、传输。NCS 省去了点对点连接的铺设，降低了系统的成本、便于扩展和维护，而且有效地结合了计算机、网络通讯技术以及智能节点控制等先进技术，具备信息共享、远程检测与管控、提高系统的灵动性和可靠性等优点，具备完成复杂控制的功能。正因为这些，NCS 在汽车控制领域、航空航天体系、电力体系和工业过程控制体系等工业范畴



获得了普遍的关注和使用^[1]。

图 1-1 基于以太网的 NCS 结构简图

国外学者 Astrom 和 Wittenmark 建立了数学模型，对于存在于反馈回路系统种的网络控制化系统中的网络诱导时延进行猜想，并对此猜想进行了全面并详细的分析，根据猜想建立数学模型。将不同的周期划分为不同的分界点，并因此将网络诱导时延划分为不同的区域（假设网络诱导时延的定常的），将诱导时延信号作为增广系统的状态是因为他们运用了一种特别的方法，这个方法大致是通过系统状态增广法增加系统维数。通过研究网络控制系统的时频特性来研究网络诱导时延^[2]。

国内著名控制学者 Lihong Xu 和 Yanyu Hu 他们经过几年的研究发现一个方法,他们把 NCS 看作为一种线性控制器伴随的随机线性系统进行分析,然后描述次跳跃线性系统通过运用 Lyapunov 定理,建立增量状态空间离散模型控制系统,同时建立了一种特别的网络化控制系统,此系统具有很精确的预测功能^[3]。

网络控制系统和网络的动态模型是由 Zhang W., Branicky M.S. 建立的。他们经过不懈的努力总结出很多直到现在用处都极大的结论。他们发现了当时的研究方法的不足（当时那个年代的主要研究是针对线性时不变的稳态控制系统的研究,这个范围很狭小）。他们发现当时研究方法不能有效的解决不确定的线性时变的问题,因此人们不能有效地统一网络系统模型。另外,由于当时的技术有限,人们并不能发现网络控制系统性能与网络服务质量的关系,所以很难设计综合控制和网络协作的综合模型^[4]。

Weihua Fan 等提出了一种新的网络控制系统建模方法。系统建模,主要基于异步动态系统。更多分组传输或分组丢失,但不考虑噪声干扰^[5]。

1.3 网络控制系统的基本问题

1.3.1 网络控制系统

网络控制系统 (Networked control systems, 简称 NCS) 是一种充分网络化、分散化的控制体系。在网络化控制系统中信息的输入、信息的输出通过网络在系统的各个部分进行交互交换。NCS 广泛应用于自动化制造电厂、机器人、航天航空、军事等先进的领域中。

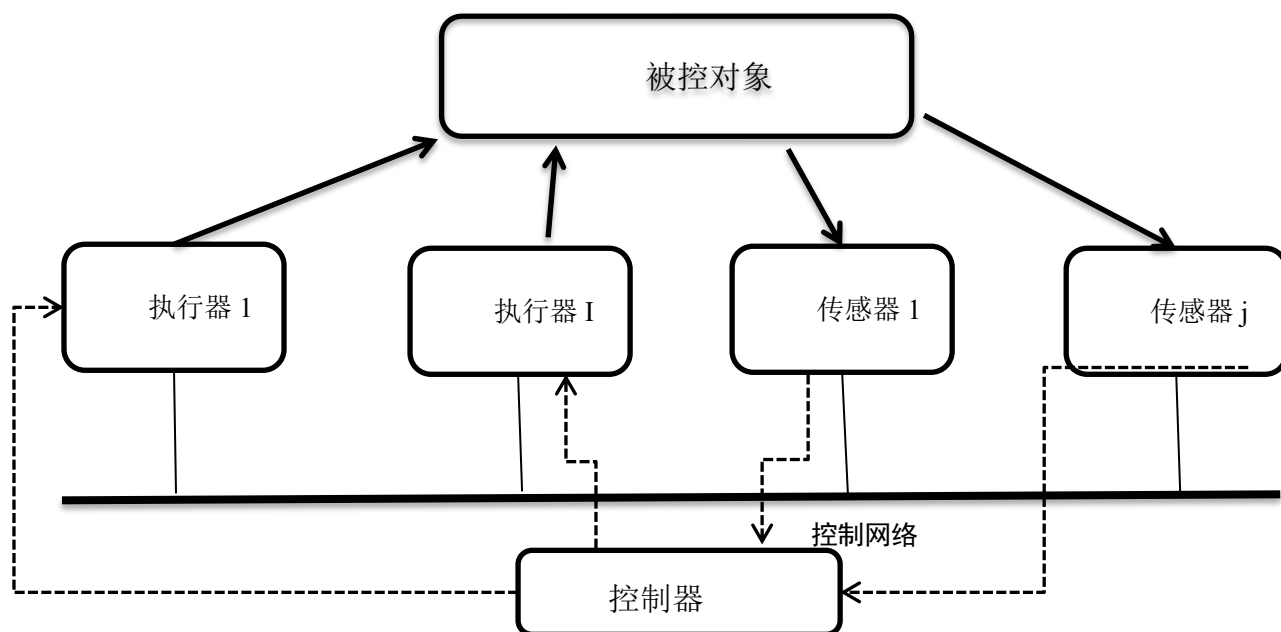


图 1-2 网络化控制系统的典型结构

1.3.2 网络化控制系统的分类

由于网络化控制系统的使用范围不同，可分为两种类型，分别为狭义网络控制化系统和广义网络化控制系统。

狭义时延网络控制系统是一种网络化控制系统伴随的专用的性质，即专属的网络化控制系统。生活中有很多现场总线，但 DeviceNet、ControlNet 和 LonWorks 等其他现场总线是比较常见的，这些现场总线总是存在于一些特定的区域。用于不同的设备之间的传输的是一些现场检查控制和操作设备和通信线路的集成，因此这使得狭义时延网络控制系统中的不同的地点的设备和用户失去了实现资源共享和一次操作的资源。

广义时延网络控制系统是是一种网络化控制系统，它的特点是针对网络信息网络的网络化控制系统，是一种完全分布的控制方法。它具有很强大的功能，首先它可以调节和检测网络控制系统的本体，而且还可以实现另外一种功能。这个功能可以实现工厂车间生产过程的监控、调优、优化，大大的增加了工厂车间的效率。

根据系统特性可分为奇异网络控制系统和非奇异网络控制系统，其数学模型分别为：

$$\text{奇异网络控制系统: } \begin{cases} E\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\text{非奇异网络控制系统: } \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (1.2)$$

1.3.3 网络诱导时延

在 NCS 中，在多个部件之间传输和交替数据时，由于网络带宽的限制和网络中数据流量的随机无规律波动，便会形成一系列的数据中断，网络衔接中断，网络堵塞等网络诱导时延问题。并且，在 NCS 中各个节点处理大量的数据也会造成网络诱导时延。这些由于引入数据信息、传输数据信息而造成

网络的延时，称为网络诱导时延（Network-induced delay）。

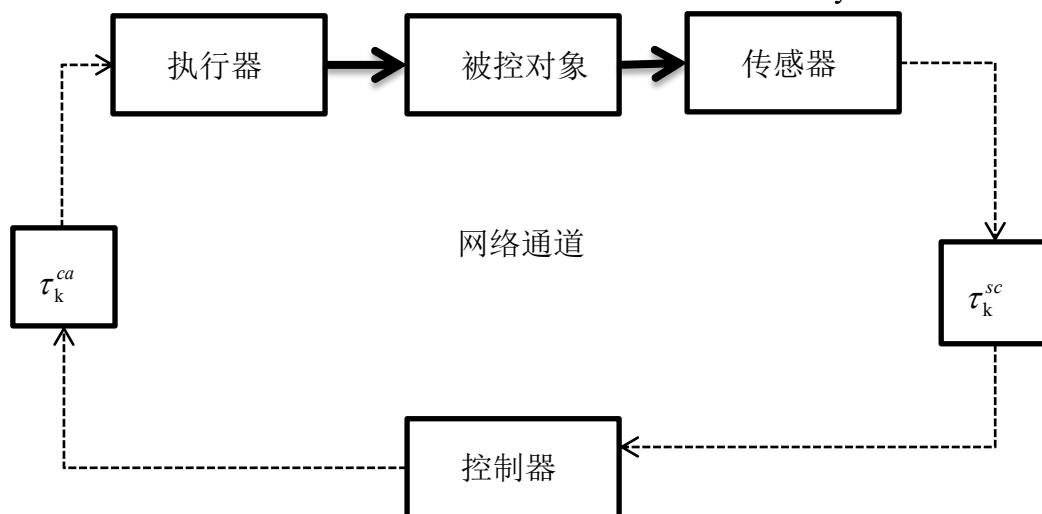


图 1-3 网络诱导时延图解

1.4 网络控制系统时延特性

网络控制系统是节点设备与执行器的联合，形成一个统一的整体。网络控制化系统顾名思义是一种自动控制系统，通过封闭的实时网络来实现

控制功能，形成反馈控制。通过网络交换控制系统各部分的信息，得到闭环反馈控制系统。结构图如下。

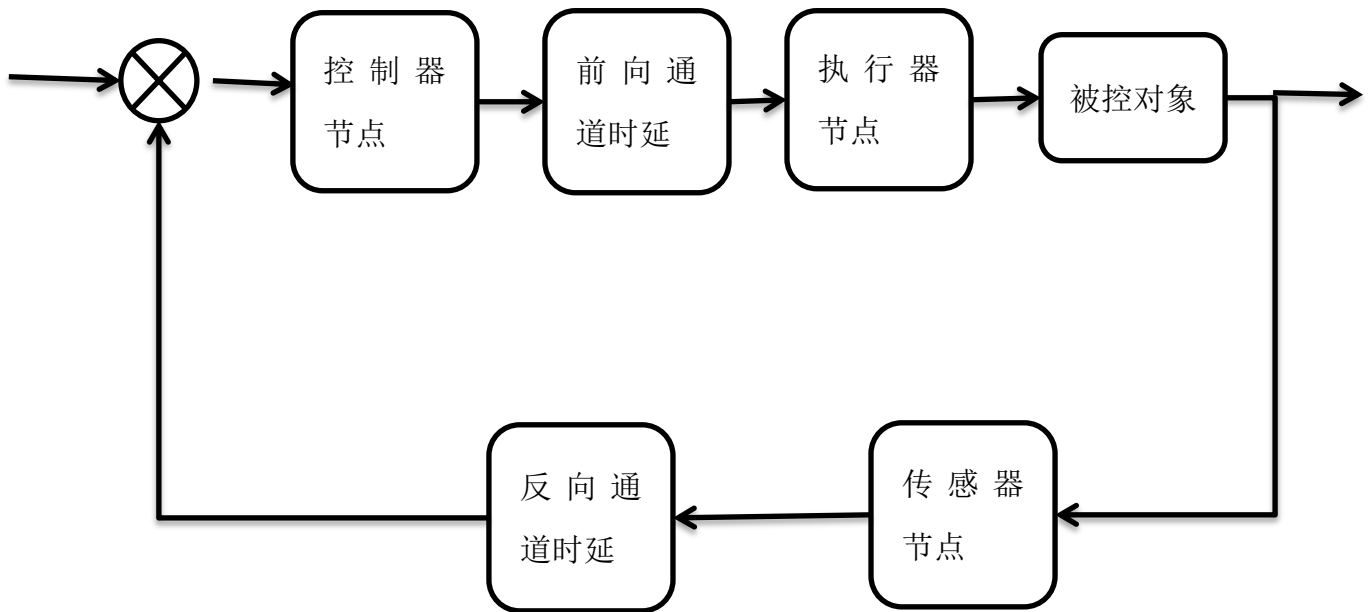


图 1-4 网络控制系统的结构框图

1.5 本文的主要工作

第一章为绪论，简要概述 NCS 的研究背景与研究意义。简要指出国内外知名学者在 NCS 领域上的造诣，其研究 NCS 网络诱导时延的研究方法及其数学建模思想。简要提出网络控制化系统以及网络诱导时延的概念及其在生活中的应用。

第二章为论文的预备知识，简要提出后文运用到的理论知识，以及部分理论的推导，给出相关的理论定义以及概念。

第三章主要对于网络诱导时延的 NCS 分析，以及针对网络控制系统的采样技术的分析。

第四章为假设一种存在具有固定时延的系统为研究对象，其所测量的数据为至少大于一个采样周期的长时延，对此进行分析和控制器的设计。

第五章为假设一种存在具有随机时延系统为研究对象，对此进行分析和控制器的设计。

2 预备知识介绍

2.1 NCS 网络诱导时延模型

在 NCS 系统中引入通信网络后，大大增加了 NCS 系统的优点，因为网络本身就有大量的优点，但是当引入通信网络后，NCS 系统无疑会出现一些缺点和漏洞。比如因为网络带宽有限而造成的网络堵塞，从而造成网络诱导时延和数据包的丢失，这些问题极大的削弱了 NCS 系统的稳定性并且降低了系统的效率。所以，在学术方面来说，研究 NCS 系统的网络诱导时延的意义重大。本节即简要讲解 NCS 网络诱导时延模型的建立。

如图所示为具有网络诱导时延的网络化控制系统的结构框图。

被控对象为连续时间对象，控制器为离散控制器。

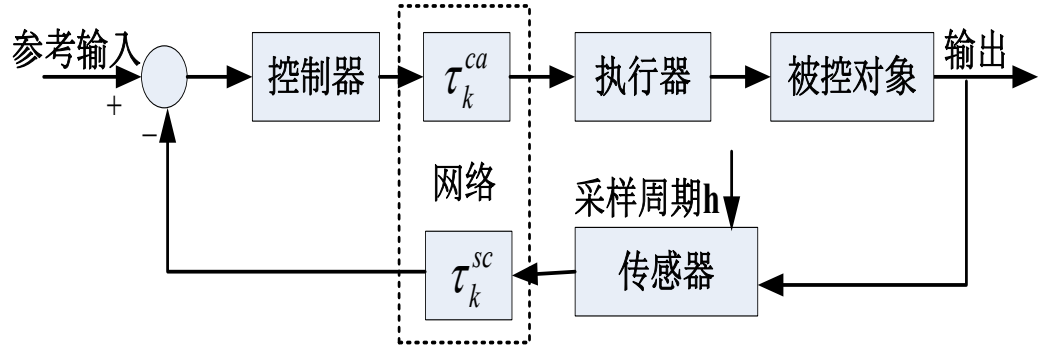


图 2-1 网络诱导时延的结构示意图

设网络化控制系统中连续方程为：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau_k^{ca} - \tau_k^{sc}) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$

为了使研究系统更加高效便捷，现对 NCS 做出下列 6 种假设：

- 1) 假设每个传感器节点的驱动方式为时间驱动，采样周期 T 固定并在被

控对象输出端采集结果。将采样后的结果以数据网络形式发送到控制器。

- 2) 假设每个控制器节点的驱动方式为事件驱动,当传感器采集的数据传送到控制器时,控制器立刻处理并且输出控制信号。
- 3) 假设每个执行器节点的驱动方式为事件驱动,当控制器的信号到达执行器时,执行器立刻修改并且输入信号。
- 4) 使用时间驱动方式的传感器节点,相同的采用周期为 h ;
- 5) 假设总时延 $0 < \tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^{ca} < h$, 公式中 τ_k 为不变或变化的;
- 6) 假设总时延 $0 < \tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^{ca} < lh$, 公式中 τ_k 为不变或变化的。

建立数学模型, 根据以上的不同的排列组合。

E.g. (1) 每个节点的时序图为:

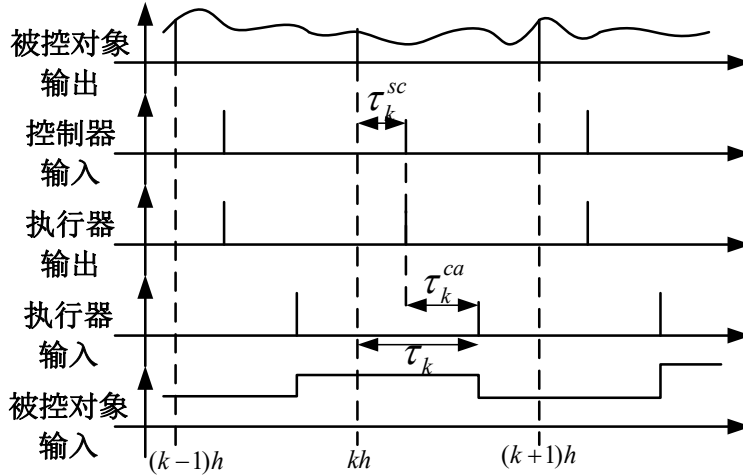


图 2-2 所有驱动方式都采用 event-driven 方式的时序图

经过分析计算由上面的假设可以得到离散时间的模型为:

$$x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma_0(\tau_k)u_k + \Gamma_1(\tau_k)u_{k-1} \quad (2-1)$$

其中, $\Gamma_0(\tau_k) = \int_0^{h-\tau_k} e^{As} B ds$, $\Gamma_1(\tau_k) = \int_{h-\tau_k}^k e^{As} B ds$, $\Phi = e^{Ah}$

则假设时序如下:

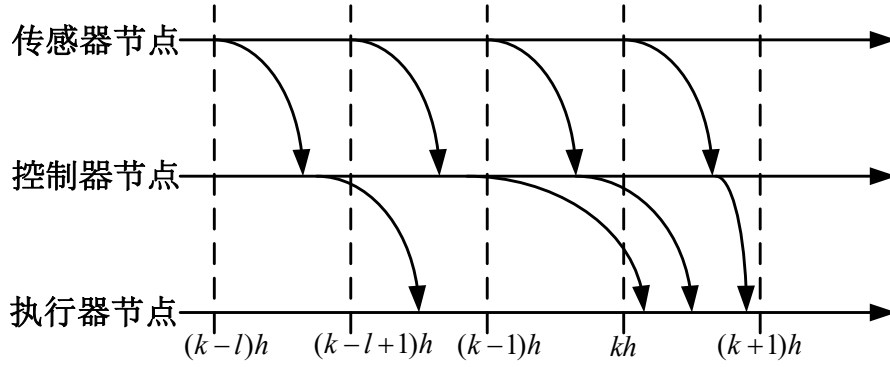


图 2-3 控制器与执行器均用事件驱动方式的时序图

在传感器与控制器之间设置一个缓冲区，可防止 k 时刻发出的信息晚于 $k+1$ 时刻发出的信息，这种方法可以保证信息遵从时间顺序发出。

根据图 2-3，当执行器为事件驱动时，在周期 $[kh, (k+1)h)$ 内控制量分段连续并最多有 $l+1$ 个值，它的序列为 $kh + t_i^k$, $i = 0, 1, 2, l-1$, $t_i^k > t_{i+1}^k$, $t_{-1}^k = h$, $t_l^k = 0$ ，则经过分析计算可得离散模型为：

$$x(k+1) = A_s x(k) + \sum_{i=0}^l B_i^k u_{k-1} \quad (2-2)$$

$$\text{其中 } A_s = e^{Ah}, \quad B_i^k = \int_{t_i^k}^{t_{i-1}^k} e^{A(t-\tau)} B d\tau。$$

2.2 Lyapunov 稳定性理论

俄国数学家和力学家 A.M.李雅普诺夫在 1892 年所创立的用于分析系统稳定性的理论。Lyapunov 理论主要指的是 Lyapunov 的第二方法，又称为 Lyapunov 直接法，该方法可用于任意阶的系统。Lyapunov 的第一方法，又称为 Lyapunov 间接法，但是其影响远不及 Lyapunov 第二方法。

Lyapunov 第二种方法有很大的局限性，在运用时要求运用者有很多的技巧和经验，并且其推导出来的结论具有一定的局限性（只是系统为稳定

或不稳定的充分条件)。有一种情况发生时不能对系统的稳定性做出判断，这种情况是当一个函数不能用来证明平衡状态是渐近稳定或不稳定时。^[6]。

对于线性定常连续系统

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \quad (2.1)$$

渐近稳定的充要条件是状态矩阵 A 的特征值均具备负实部，即，

$$\operatorname{Re}(\lambda_i) < 0 (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.2)$$

对于线性定常离散系统

$$x_{k+1} = Ax_k \quad (2.3)$$

渐近稳定的充要条件为状态矩阵 A 的特征值

$$|\lambda_i| < 1 (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.4)$$

对于系统 (2.1)，若存在 Lyapunov 函数 $V(x(t), t)$ 满足条件：

- 1) $V(x(t), t)$ 是正定的
- 2) $V(x(t), t)$ 是负定的

则称系统在原点处是渐近稳定的。

对于系统 (2.2)，若存在 Lyapunov 函数 $V(x_k, k)$ 满足条件：

- 1) $V(x_k, k)$ 是正定的
- 2) $\Delta V(x_k, k)$ 是负定的

则称系统在原点处是渐进稳定的。

2.3 线性矩阵不等式理论

线性阵不等式是控制系统的万金油，因为它可以有效并且准确的解决其中发生的种种问题，随着求解线性矩阵不等式的内点法的提出、MATLAB

软件中 TRUEtime 工具箱的推出^[7]，线性矩阵不等式这个方法逐渐的走进了研究者的视野中，并且愈来愈普及，甚至应用线性矩阵不等式来解决控制系统的问题已成为控制领域的时代潮流^[8]。1890 年 Lyapunov 在他出版的《Lyapunov theory》的著作中，直接提出了微分方程 $\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t)$ ：当且仅当存在对称正定矩阵 $P = P^T > 0$ ，使得 $A^T P + PA < 0$ 。它是 LMI 的一种特殊形式称为线性矩阵不等式。

线性矩阵不等式的一般形式可以表示如下：

$$F(x) = F_0 + x_1 F_1 \dots x_n F_n < 0 \quad (2.5)$$

其中 $x_i \in R^n, i=1,2,3,\dots,n$ 表示线性矩阵不等式的决策变量， $F_i = F_i^T \in R^{m \times m}, i=1,2,3,\dots,m$ 表示给定的正定对称矩阵，式 (2.5) 中的“<”表示矩阵 $F(x)$ 是负定矩阵，可知对于任意非零向量 $v \in R^n$ 有 $v^T F(x) v < 0$ 。

2.3.1 LMI 与控制化系统性能指标关系

系统性能指标是指在系统中一些衡量系统性能的定量指标，根据情况不同定义不同的指标。 H_∞ 性能通常指系统传递矩阵的 H_∞ 范数（系统频域响应的最大奇异值的峰值）。 H_2 性能是指系统传递矩阵的 H_2 范数（数值的平方等于系统脉冲响应的输出能量）^[9]。

H_∞ 控制是一种控制方法基于 H_∞ 性能的各种指标，有两种控制。第一种是状态反馈 H_∞ 控制，另外一种是输出反馈 H_∞ 控制。

1) 系统的状态可以直接通过表述时,可用状态反馈 H_∞ 控制

2) 系统的状态不可以直接通过表述时，可采用输出反馈 H_∞ 控制

2.4 MATLAB 仿真软件

由美国 Mathworks 公司创作的专业商业型数学软件，专业面对科学计算、可视化以及交互式程序设计的高科技计算环境。MATLAB 中的 LMI 工具箱的出品为解决线性矩阵不等式理论的难题变得容易，让用户更加方便。

3. 网络控制化系统的采样技术

3.1 同步采样

同步采样（Synchronous Sampling Mechanisms），在相同周期内，网络控制系统中的所有采样开关均为同时开启或关闭。

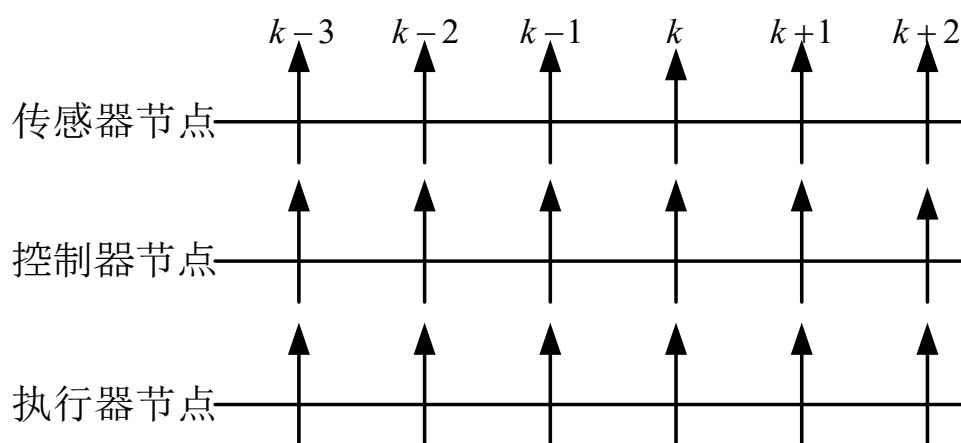


图 3-1 同步采样开关时序图

3.2 非同步采样

非同步采样（Asynchronous Sampling Mechanisms），当在 NCS（网络

化控制系统) 中的采样开关不是同时开启或者同时关闭时, 则这些开关我们称其为非同步采样。

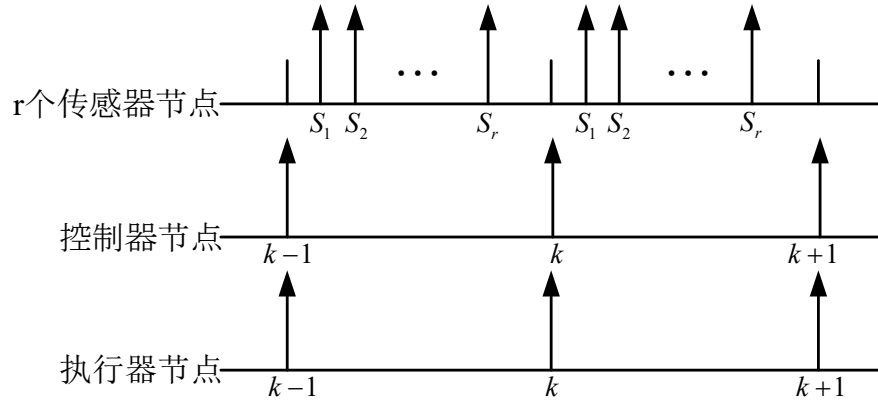


图 3-2 非同步采样时序图

3.3 时间驱动方式

时间驱动(Time-driven), 它指的是在控制器节点的 Time 采样传感器测量并且传输信号。这是一个过程在采样时钟的控制下, 通过某个特定的算法发送给执行器。

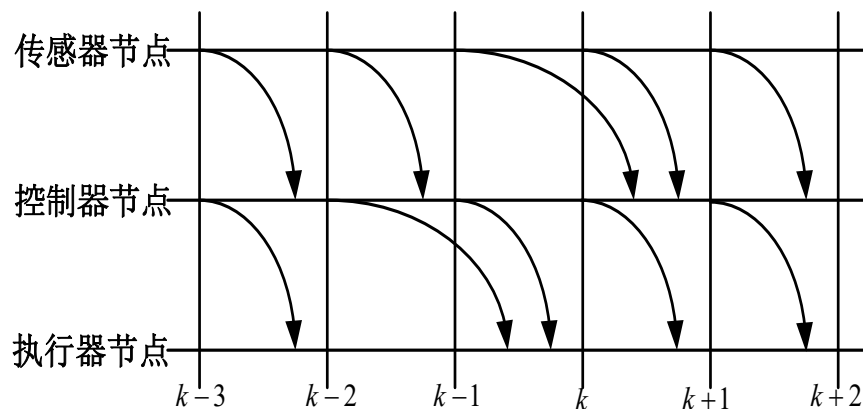


图 3-3 信息传送时序图

在时间驱动模式下, 控制器节点上出现消息拒绝和空采样。主要原因是时延 (传感器节点到达控制器节点), 时变, 控制器使用上一个采样周期的数据。因此, 当一个固定的采样周期被到达时, 控制器只能接受最近采

样的传感器数据。网络控制系统来计算控制量，我们称之为信息丢弃。在时间驱动模式下，执行控制程序和计算控制量只能在一个固定的时间间隔内。另一方面，空采样是指控制器节点在一个采样周期内没有得到新的传感器数据，因此过去的传感器数据用于计算控制量。假设第 k 个采样周期中，一个空采样出现在控制器中，这意味着第 k 个采样周期与 $(k+1)$ 期间计算的控制量相同。

3.4 事件驱动方式

事件驱动（event-driven）事件驱动指的是在最后的交易管理过程中，制定一个策略，在当前时间点作出决策，在合约调动可用资源的情况下，执行相关任务，不断解决问题，防止交易堆积。在计算机编程，公关，经济活动等领域有应用。

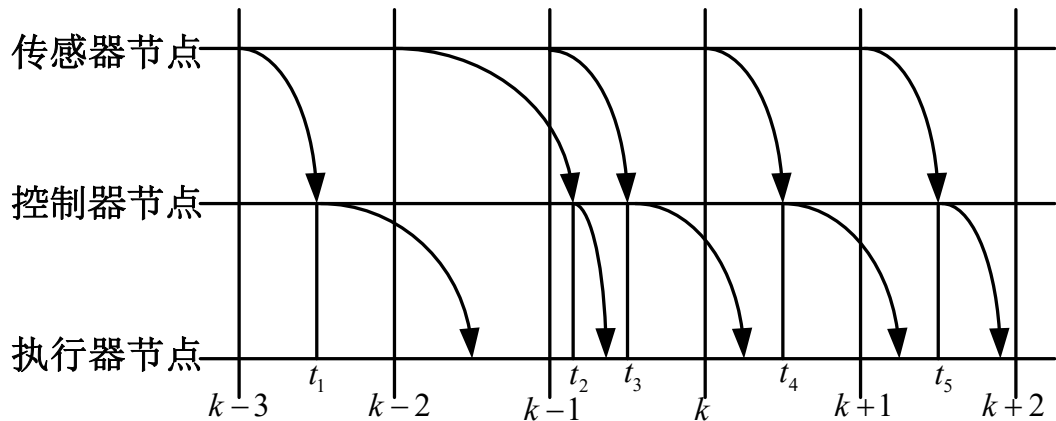


图 3-4 事件驱动下的信息传输时序图

由图可以得出 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, \dots$ 是控制器计算控制量时刻。

类似地，传感器采样实时信号所需的时间称为传感器处理时间，并且执行器对控制信息的响应时间称为执行器处理时间。因此，在 NCS 中，通信延迟和节点处理延迟两种来区分延迟。网络控制系统中存在两种网络延迟：（传感器到控制器时延）和（控制器到执行器延迟）。

NCS 中，存在产生时延 T_s 、传输时延 T_t 、传递时延 T_d 和排队时延 T_q 。

(1) 产生时延 T_g

达到系统要求所需的时间。大多数时候，我们认为任务的处理时间可以忽略不计，但这取决于任务。

(2) 传输时延 T_t

这是网络传输信息所需的时间。传输延迟与媒体电气特性，节点距离，网络速度和数据帧大小距离有关。

(3) 传递时延 T_d

目标节点收到（从源节点）到目标节点的信息以处理信息的时间到了。

(4) 排队时延 T_q

信息需要访问总线所需的时间，但在源节点队列中等待。排队延迟与信息编号，网络协议，网络负载和调度方法有关。然而，网络协议是一个重要的影响因素，因此在网络化控制系统中，应该选择实际的通信网络，以使系统的性能不会受到很大的影响。

因此，总时延为 $\tau = T_g + T_q + T_t + T_d$ 。

4. 具有固定时延的网络化控制系统控制器设计

4.1 缓冲区的设立

在网络化控制系统中，时延可分为固定时延和随机时延。但是严格意义上讲，固定时延是不存在的，只存在于理想状态下，本节主要探讨在理想状态下（具有固定时延）的网络化控制系统的控制器的设计。

为了是时延固定，我们在执行器和控制器的接收端设立一个缓冲区，如图所示：

$$e_{k|k-p} = X_k - \hat{X}_{k|k-p} \quad (4-5)$$

式 (4-2) 中 L 的定义如下:

当 P 误差 $E\{e_{k|k-p}^T e_{k|k-p}\}$ 最小的矩阵 L_{\min} 时:

$P=1$, 则最小的方差矩阵 K_p , 所以 $L_{\min} = K_p$ 。

由 Kalman 滤波理论 (下节介绍), 有 $K_p = AK_f$, 其中 K_f 为 Kalman 滤波增益。

所以, 这个控制器有滤波功能, 能够消除噪声对 NCS 的影响。

4.3 Kalman 滤波理论

4.3.1 信号模型

在描述一个信号系统, 有两种类型的信号, 一个是一个真正的信号, 反映了系统状态的变化, 和另一个是观测信号通过仪器测量等手段, 观察信号不等于真正的信号。由于仪器设计、测量操作等方面存在误差, 在卡尔曼滤波中, 信号模型由两个方程决定:

状态方程: $x(k)=A(k)x(k-1)+w(k-1)$

量测方程: $y(k)=C(k)x(k)+v(k)$

其中, 第一个方程反映了系统状态随时间的变化, $A(k)$ 被称为状态转移矩阵, 它的元素可以随时间变化, 它也可以是一个固定值, w 是在状态转换过程中可能存在的噪声。第二个方程是系统状态的观测过程, $C(k)$ 称为测量矩阵, v 是信号测量过程中存在的噪声。

4.3.2 算法原理

对于一个信号系统, 如果已知初始状态 $x(0)$ 和状态转移矩阵 $a(k)$, 系统的状态信息可以随时得到, 这是理想情况下得到的, 不需要任何外部干

扰。推论，就是得到理论价值。在任何时候，通过某种方式测量系统也会产生一个称为观测值的值。

在实际应用程序中,理论值是否用作信号反映了系统信息或观测值使用,理论价值的期望值是根据严格的理论推导,获得的系统和观测值实际上是反映系统状态信息。显然，理论的价值或观察有其自身的局限性，两者的结合会带来更好的结果。

在卡尔曼滤波算法中，首先考虑了噪声的影响，得到了状态变量和观测信号的估计值。然后利用所观测到的信号与所期望的信号之间的误差校正状态变量的估计值，然后由状态转移矩阵和测量方程得到。更准确的观察。

5. 具有随机时延的网络控制化系统控制器设计

5.1 根据时延统计规律设计控制器

网络延迟的随机性主要是由网络系统中信息的等待和重传时间决定的。因此，在建模中需要考虑随机性。随机时滞网络化控制系统控制器设计的关键是对延迟的建模和估计。目前，随机时滞模型大致可分为两类：

(1) 是已知延迟的统计规律，变量是独立的。然而，这是一种理想的建模方法，只有在流量很小的情况下才适用。

(2) 将时延视为时变和有界量。这是一个更适用的延迟模型。以前的控制理论没有能够有效地解决这些问题。

因此，近年来，许多人开始研究现代控制理论来研究这些问题，并取得了许多成果。

基于第四章具有固定时延的网络化系统控制器设计的基础上，增加了稳定性的控制。

设连续模型为：

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

若 $\tau_k^{sc} + \tau_k^{ca} < h$, 当离散模型为 $x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma_0(\tau_k)u_k + \Gamma_1(\tau_k)u_{k-1}$

$$\text{其中, } \Gamma_0(\tau_k) = \int_0^{h-\tau_k} e^{As} B ds, \quad \Gamma_1(\tau_k) = \int_{h-\tau_k}^k e^{As} B ds, \quad \Phi = e^{Ah}.$$

$$\text{所以 } \begin{cases} x_{k+1} = \Phi x_k + \Gamma_0(\tau_k)u_k + \Gamma_1(\tau_k)u_{k-1} \\ y_k = Cx_k \end{cases} \quad (5-1)$$

$$\text{其中 } \Gamma_0(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) = \int_0^{h-\tau_k^{sc}-\tau_k^{ca}} e^{As} B ds, \quad \Gamma_1(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) = \int_{h-\tau_k^{sc}-\tau_k^{ca}}^h e^{As} B ds, \quad \Phi = e^{Ah},$$

定义性能指标函数:

$$J_N = E[x^T(N)Q_N x(N)] + E \sum_{k=0}^{N-1} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

$$\text{则 } Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

$$u_k = -L_k(\tau_k^{sc}) \begin{bmatrix} x_k \\ u_{k-1} \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

根据计算, 式中:

$$L_k(\tau_k^{sc}) = (Q_{22} + \tilde{S}_{k+1}^{22})^{-1} [Q_{12}^T + \tilde{S}_{k+1}^{21} \quad \tilde{S}_{k+1}^{23}]$$

$$\tilde{S}_{k+1}(\tau_k^{sc}) = E \left\{ G^T(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) S_{k+1} G(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) \middle| \tau_k^{ca} \right\}$$

$$G(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma_0(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) & \Gamma_1(\tau_k^{sc}, \tau_k^{ca}) \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_k = E \{ F_1^T(\tau_k^{sc}) Q F_1(\tau_k^{sc}) + F_2^T(\tau_k^{sc}) \tilde{S}_{k+1}(\tau_k^{sc}) F_2(\tau_k^{sc}) \}$$

$$F_1(\tau_k^{sc}) = (Q_{22} + \tilde{S}_{k+1}^{22})^{-1} \begin{bmatrix} (Q_{22} + \tilde{S}_{k+1}^{22})I & 0 \\ -(Q_{12}^T + \tilde{S}_{k+1}^{21}) & -\tilde{S}_{k+1}^{23} \end{bmatrix}$$

$$F_2(\tau_k^{sc}) = (Q_{22} + \tilde{S}_{k+1}^{22})^{-1} \begin{bmatrix} (Q_{22} + \tilde{S}_{k+1}^{22})I & 0 \\ -(Q_{12}^T + \tilde{S}_{k+1}^{21}) & -\tilde{S}_{k+1}^{23} \\ 0 & (Q_{22} + \tilde{S}_{k+1}^{22}) \end{bmatrix}$$

$$S_N = \begin{bmatrix} Q_N & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

5.2 控制器的设计

我们已经习惯于用线性矩阵不等式来解决延迟问题。线性矩阵不等式被广泛应用。线性矩阵不等式已引起越来越多的关注，并逐渐被用于网络控制系统及其分析与控制。

网络化控制系统中，传感器和执行器采用时间驱动方式，控制器采用事件驱动方式。

使用了静态反馈，所以 τ_k^{sc} 和 τ_k^{ca} 能够合并，则网络化控制系统系统构图可转化为下图：

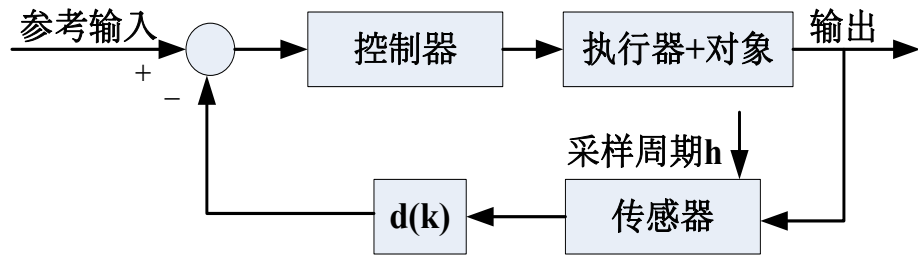


图 5-1 网络化控制系统等效图

其中 $d(k)$ 为总的环路时延。

在图 5-1 中，离散化之后的状态方程为：

$$\begin{cases} x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (5-5)$$

$$\text{控制器: } u(k) = -Kx(k-d(k)) \quad (5-6)$$

其中 $\Phi = e^{Ah}$ ， $\Gamma = \int_0^h e^{At} dt \cdot B$ ， $dm \leq d(k) \leq dM$ 。

则 K 的求值分析如下：

将公式（5-6）带入公式（5-5）中，则

$$x(k+1) = \Phi x(k) - \Gamma K x(k-d(k)) \quad (5-7)$$

为离散模型。

利用 lyapunov 稳定性定理转化为线性矩形不等式，得到：

如果 P, Q, X, Y, Z, K 矩阵使得

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{11} & -Y & \Phi^T & d_M(\Phi-I)^T \\ -Y^T & -Q & -K^T \Gamma^T & -d_M K^T \Gamma^T \\ \Phi & -\Gamma K & -P^{-1} & 0 \\ d_M(\Phi-I) & -d_M \Gamma K & 0 & -d_M Z^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (5-8)$$

$$\text{及} \begin{bmatrix} X & Y \\ Y^T & Z \end{bmatrix} \geq 0 \quad (5-9)$$

成立，则系统渐进稳定。其中 $\Sigma_{11} = -P + d_M X + Y + Y^T + (d_M - d_m + 1)Q$

求下列的最优化：

$$\begin{aligned} & \min_{P, M, Q, N, X, Y, Z, K} \text{trace}(PM + ZN) \\ & \text{st.} \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & -Y & \Phi^T & d_M(\Phi-I)^T \\ -Y^T & -Q & -K^T \Gamma^T & -d_M K^T \Gamma^T \\ \Phi & -\Gamma K & -P^{-1} & 0 \\ d_M(\Phi-I) & -d_M \Gamma K & 0 & -d_M N \end{bmatrix} < 0 \end{aligned} \quad (5-10)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} X & Y \\ Y^T & X \end{bmatrix} \geq 0 \\ & \text{及} \begin{bmatrix} P & I \\ I & M \end{bmatrix} \geq 0, \begin{bmatrix} Z & I \\ I & N \end{bmatrix} \geq 0 \end{aligned} \quad (5-11)$$

根据目标性质为非线性，则运用迭代算法：

时延 d_m ， d_M ，找可行集合 (P, M, Q, N, X, Y, Z, K) ，满足

$$\begin{aligned} & \min_{P, M, Q, N, X, Y, Z, K} \text{trace}(PM + ZN) \quad \text{st.} \\ & \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & -Y & \Phi^T & d_M(\Phi-I)^T \\ -Y^T & -Q & -K^T \Gamma^T & -d_M K^T \Gamma^T \\ \Phi & -\Gamma K & -P^{-1} & 0 \\ d_M(\Phi-I) & -d_M \Gamma K & 0 & -d_M N \end{bmatrix} < 0 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} X & Y \\ Y^T & X \end{bmatrix} \geq 0 \quad \text{及} \quad \begin{bmatrix} P & I \\ I & M \end{bmatrix} \geq 0, \quad \begin{bmatrix} Z & I \\ I & N \end{bmatrix} \geq 0$$

针对变量 (P, M, Q, N, X, Y, Z, K) ，求解如下的最小化问题：

$$\min \text{trace}(P_i M + P M_i + Z_i N + Z N_i) \quad st.$$

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{11} & -Y & \Phi^T & d_M(\Phi - I)^T \\ -Y^T & -Q & -K^T \Gamma^T & -d_M K^T \Gamma^T \\ \Phi & -\Gamma K & -P^{-1} & 0 \\ d_M(\Phi - I) & -d_M \Gamma K & 0 & -d_M N \end{bmatrix} < 0$$

$$\begin{bmatrix} X & Y \\ Y^T & X \end{bmatrix} \geq 0 \quad \text{及} \quad \begin{bmatrix} P & I \\ I & M \end{bmatrix} \geq 0, \quad \begin{bmatrix} Z & I \\ I & N \end{bmatrix} \geq 0$$

设 $P_{i+1} = P$ ， $M_{i+1} = M$ ， $Z_{i+1} = Z$ ， $N_{i+1} = N$ 。检查最优结果满足公式

14 吗，如果满足则 K 即为镇定控制器。若不满足，检测 i ，若达到规定次数，因此系统无解；反之，设 $i = i + 1$ ，重回步骤 K 的取值。

设计完毕。

6. MATLAB 仿真

6.1 truetype 工具箱

Truetype 工具箱由 TrueTime Computer 与 Truetype Network 构成。如图所示：

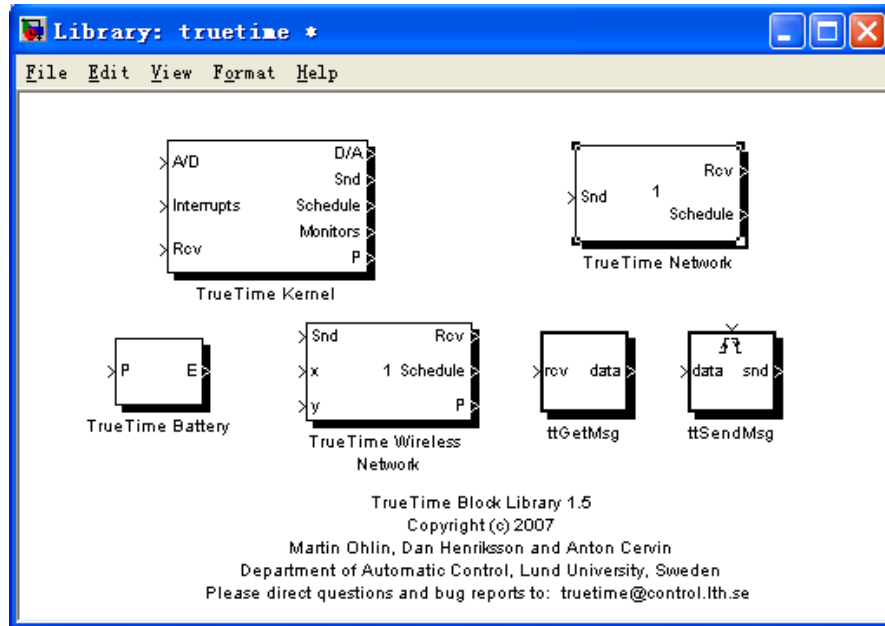


图 6-1 truetype 工具箱

Truetype 工具箱主要有 4 种功能:

- (1) 研究对系统的影响
- (2) 对系统进行补偿
- (3) 动态调度方法
- (4) 仿真应用

6.2 参数设定

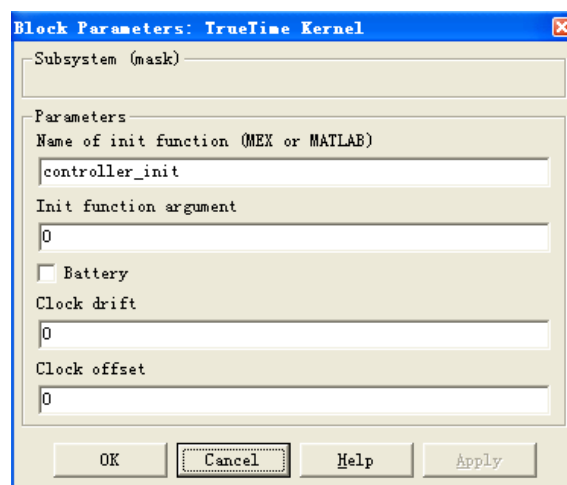


图 6-2 计算机模块参数设定

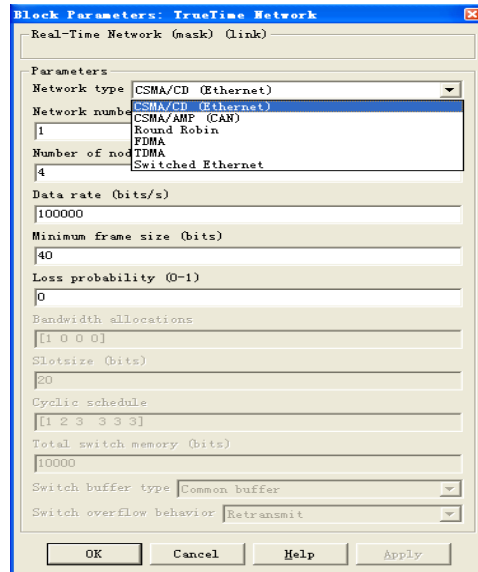


图 6-3 truetype network 计算机模块参数设定

设定参数后，将模块 truetype network 和模块 truetype computer 进行初始化，首先调度策略使用 prioFP 方式。所以我们之后的初始化程序为：
`ttInitKernel(1, 0, 'prioFP')`，FP 协议为我们所使用的协议。然后使用事件驱动节点，则使用 `ttCreateInterruptHandler` 函数，制定的调度策略为中断性。最后在设置窗口设置传输速率、节点数、网络类型以及丢包率等参数。

创建一个名为“pid-task”的非周期任务，并从“ctrlcode.m”中获得代码。

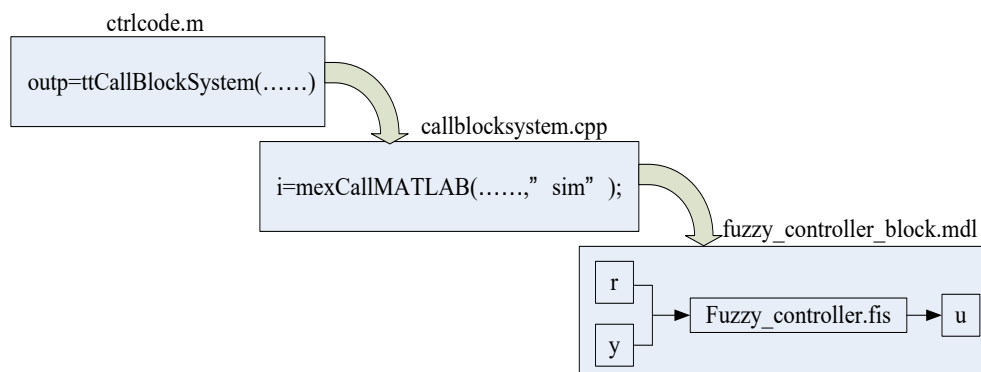


图 6-4 仿真结构图

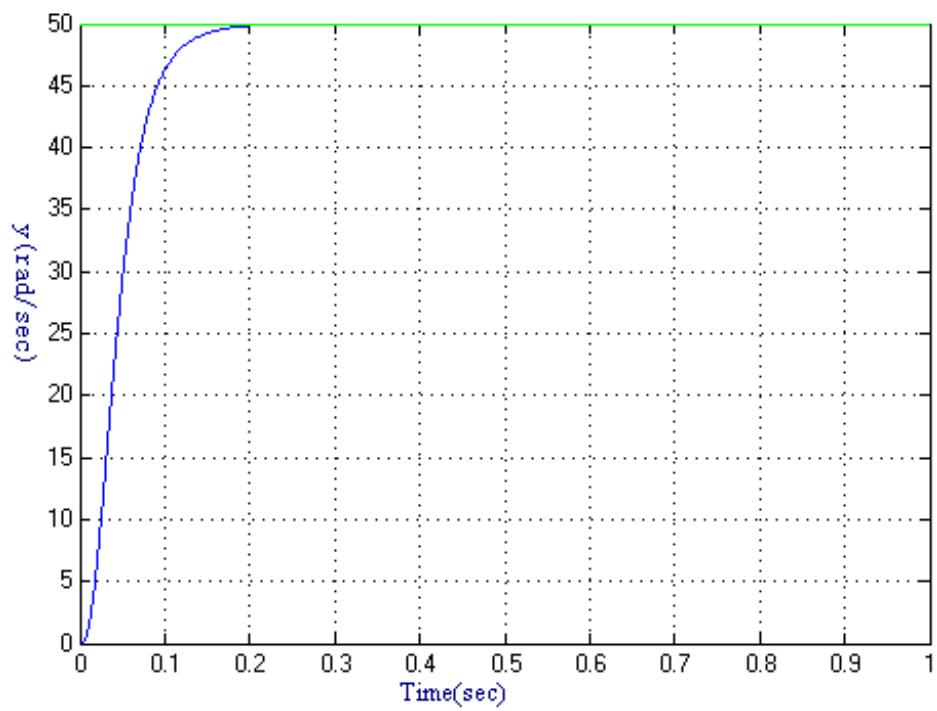


图 6-5 带 PID 的以太网仿真特性

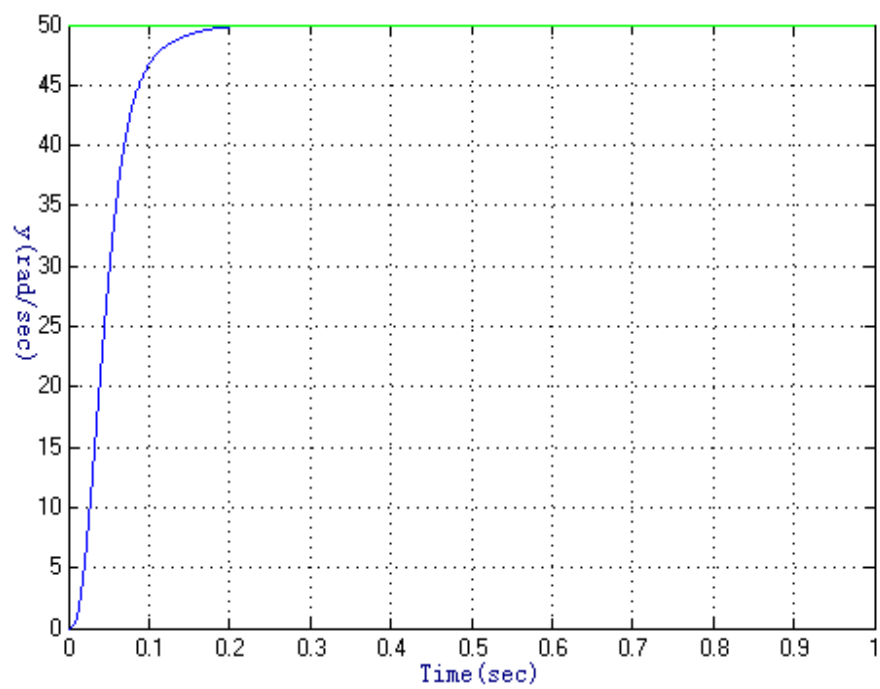


图 6-6 带 PID 的令牌仿真特性

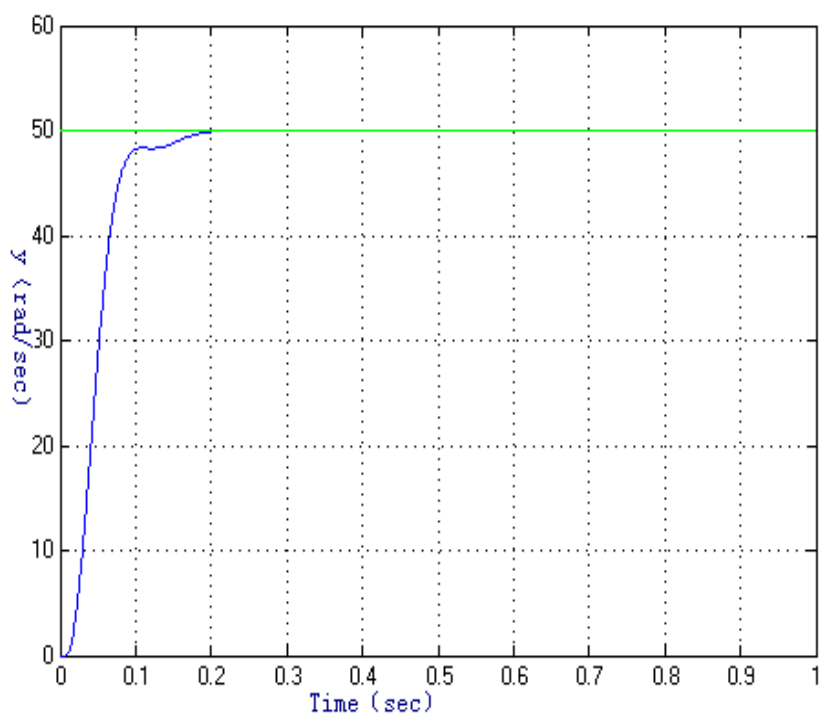


图 6-7 时延小于 H 以太网仿真特性

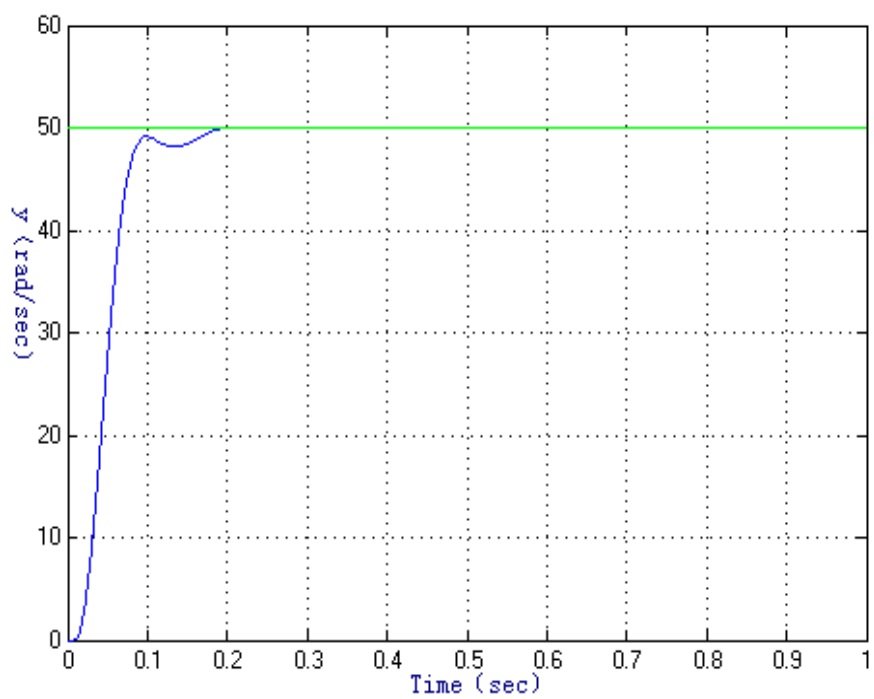


图 6-8 时延小于 H 令牌网仿真特性

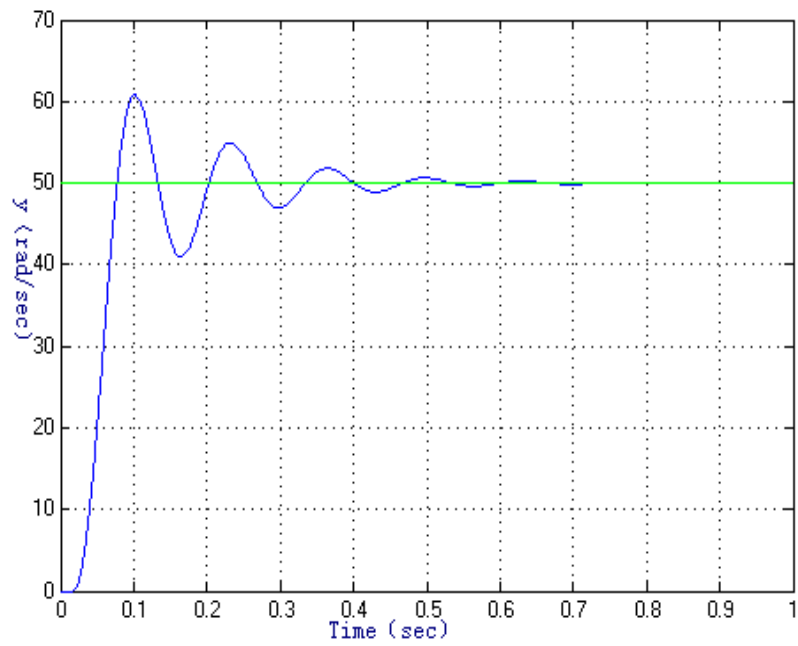


图 6-9 时延大于 H 以太网仿真特性

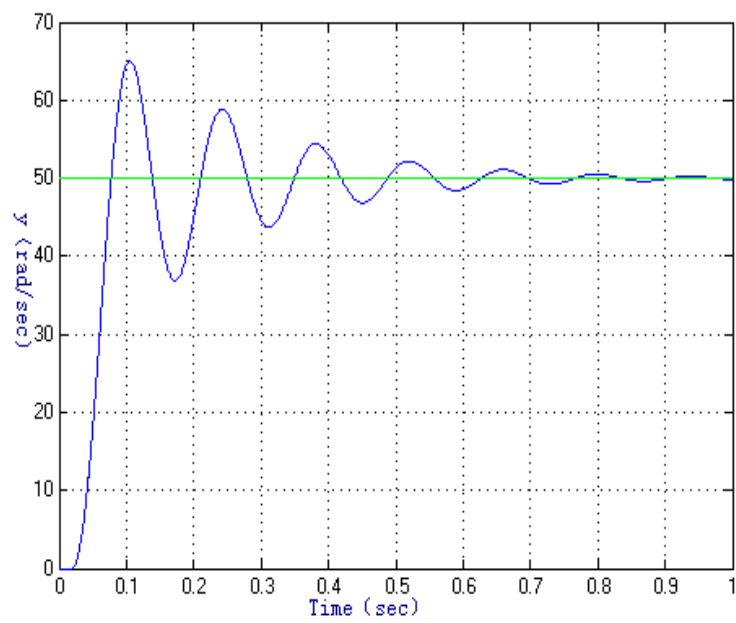


图 6-10 时延大于 H 令牌网仿真特性

6.2 仿真结果

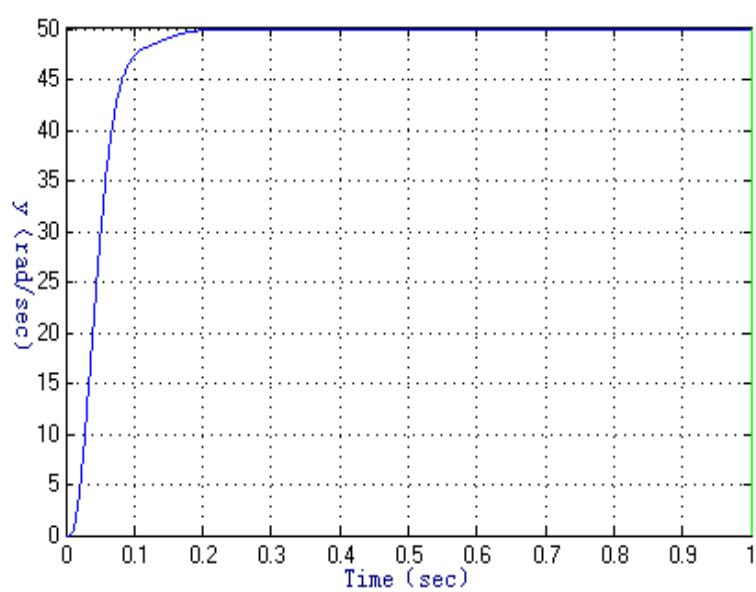


图 6-11 时延小于 H 时加模糊补偿

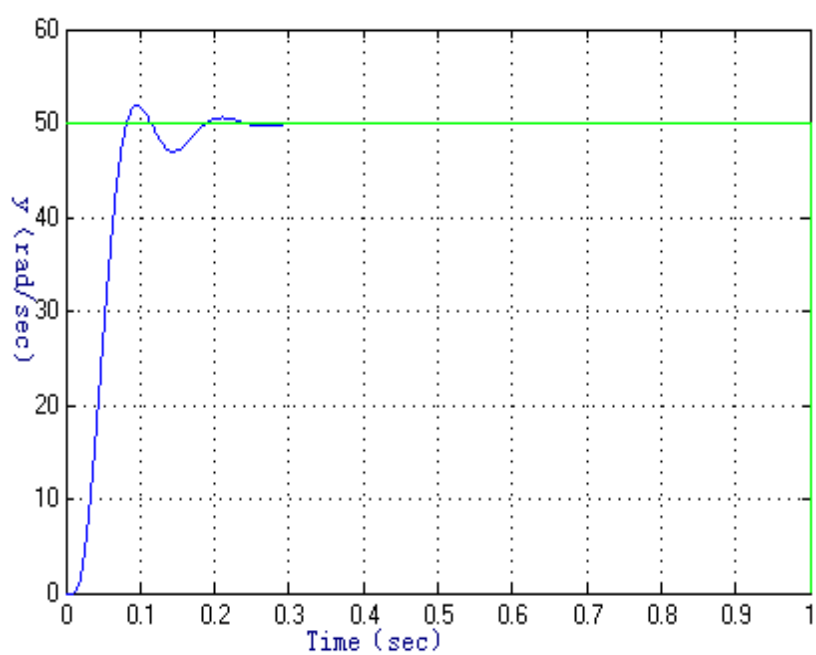


图 6-12 时延大于 H 时加模糊补偿

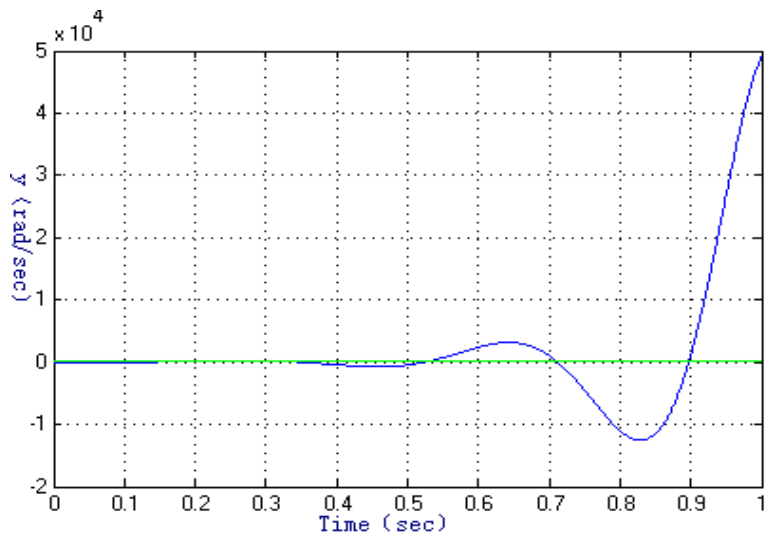


图 6-13 时延大于 10H 加模糊补偿

参考文献

- [1] 杨淞迪. 基于时延和丢包网络控制系统的容错控制研究[D]. 沈阳工业大学 2017.
- [2] 白爽. 基于网络的控制系统稳定性分析[D]. 华北电力大学 2016.
- [3] 张政. 网络控制系统时延分析与补偿控制研究[D]. 昆明理工大学 2015.
- [4] 胡松钰, 吴伟, 钱松, 潘剑飞, 邱丽. 具有网络时延的直线开关磁阻电机位置跟踪控制[J]. 深圳大学学报 (理工版), 2017 年, (4): 434-440.
- [5] 魏宇. 基于切换系统处理方法的网络化控制系统稳定性分析[J]. 太原科技大学 2015.

- [6] 伍德鹏. 网络控制系统的稳定性及量化影响分析[D]. 杭州电子科技大学 2015.
- [7] 宋娟,曹自洋. 含时延的网络控制系统的 H_{∞} 保性能控制器设计[J]. 广西师范大学学报(自然科学报), 2016 年, (7): 78-84.
- [8] 李郅辰. 基于积分不等式的时滞系统稳定性分析和控制[D]. 华北电力大学 2017.
- [9] 朱义金. 具有测量数据丢失与长时延的网络化控制系统 H_{∞} 控制[D]. 南京邮电大学 2016.
- [10] 许强,陈其工,葛愿,曾晗. 网络化环境下双电机的同步控制研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2014,03:72-79.
- [11] 朱其新,卢开红,朱永红,胡寿松. 具有马尔科夫分布时延网络控制系统的保性能控制器设计[J]. 航天控制,2014,04:3-7.
- [12] 宋娟,蒋全胜. 具有时变时延网络控制系统的 H_{∞} 控制器设计[J]. 广西大学学报(自然科学版),2016,05:1493-1499.
- [13] 李炜,蒋栋年,张建全. 基于输出反馈网络化控制系统鲁棒容错控制[J]. 控制工程,2011,01:62-66.
- [14] 李炜,申富媛,曹慧超. 具有 α -稳定的网络化控制系统容错设计[J]. 兰州理工大学学报,2011,02:73-79.
- [15] 梁军,桂卫华,伍晓峰. 球杆网络化控制系统的延时分析与控制方法研究[J]. 计算机与应用化学,2011,07:883-886.
- [16] 郑英,方华京,谢林柏,曹新苗.具有随机时延的网络化控制系统基于等价空间的故障诊断[J].信息与控制.2003,02:230-235.
- [17] 彭可,盘清林,邵添,聂建,李国平.具有反馈数据丢包的网络化控制电力无功优化改进算法[J].中南大学学报.2013,09:45-49.
- [18] 金辉,郭戈,王宝凤,冯艺伟,于双和.具有马尔科夫链延迟的网络化控制系统控制与通信协同设计[J].清华大学学报.2008,02:122-143.
- [19] 张玉泉,钟秋海,王林.具有时滞和丢包的网络化控制系统稳定性分析[J].北京理工大学学报.2008,04:43-54.

致谢

首先,作为本科四年最后的任务,我很认真的对待这篇论文,全心全意的去对待它。在论文撰写过程中,我的指导教师耐心的为我解答了很多学术上的问题,再次衷心表示感谢。因为没有老师的指导传授,本人很难完成这篇文章。同时感谢论文小组的同学们,给了我很大的支持和帮助。最后要感谢的是这些无私的奋斗在网络化控制系统的一线学者,是他们的文章给了我启迪,是他们的研究成果启发了我,没有他们坚持不懈的奋斗,就没有我们网络化发展飞快的今天。再次对他们表示感谢!