



浙江工业大学

# 硕士学位论文

无线多跳网络控制系统中的调度与控制协同设计

作者姓名	袁征
指导教师	赵云波 教授
学科专业	控制科学与工程
学位类型	工学硕士
培养类别	全日制学术型硕士
所在学院	信息工程学院

提交日期：2020年01月



# Codesign of Scheduling and Control in Wireless Multi-hop Networked Control System

Dissertation Submitted to

**Zhejiang University of Technology**

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

**Master of Engineering**



by

**Zheng YUAN**

Dissertation Supervisor: Prof. Yun-Bo ZHAO

Jan. 2020



## 浙江工业大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提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研究成果。除文中已经加以标注引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不含为获得浙江工业大学或其它教育机构的学位证书而使用过的材料。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承担本声明的法律责任。

作者签名：袁征

日期：2019年 11月

## 学位论文版权使用授权书

本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，允许论文被查阅和借阅。本人授权浙江工业大学可以将本学位论文的全部或部分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。

本学位论文属于 1、保密□，在一年解密后适用本授权书。

2、保密□，在二年解密后适用本授权书。

3、保密□，在三年解密后适用本授权书。

4、不保密□。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：袁征

日期：2019年 11月

导师签名：袁征

日期：2019年 11月



中图分类号 TP273

学校代码 10337

UDC 621.3

密级 公开

研究生类别 全日制学术型硕士研究生



浙江工业大学

硕士学位论文

无线多跳网络控制系统中的调度与控制协同设计

Codesign of Scheduling and Control in Wireless Multi-hop  
Networked Control System

作者 袁征

第一导师 赵云波

申请学位 工学硕士

学科专业 控制科学与工程

培养单位 信息工程学院

研究方向 网络化控制

答辩日期: 2019 年 11 月 26 日





# 无线多跳网络控制系统中的调度与控制协同设计

## 摘 要

网络化控制系统是将传感器、控制器和执行器通过通信网络相连构成闭环的控制系统，凭借低成本、易安装、易拓展、易维护等优点受到广泛的欢迎。而无线多跳网络控制系统是一种使用无线多跳网络进行信息通信的网络化控制系统。无线多跳网络在部署上的限制更小、应用场景更广泛、容错性更强，用其构建的网络化控制系统有着巨大潜力的应用前景，极具研究意义和实用价值。

多跳网络在为控制系统引入许多优点的同时，也带来了许多新的问题。网络化控制系统中常见的时延和丢包问题在多跳网络中具有更复杂的形成原因，带来更大的分析难度；多节点带来多通信路径可能造成多个系统通信时的路径冲突；此外，节点能量有限，无法支持控制系统长时间高频次通信的需求。对于这些必须考虑的新问题，传统的控制理论和处理方法或是无法适用，或是保守性太强，这对无线多跳网络控制系统的设计与分析提出了新的挑战。

本文研究了无线多跳网络控制系统中的能量限制、数据误码、通信时延等问题，对其提出了相应的设计思路和分析方法，并通过仿真验证了所提方法的有效性。本文的主要工作成果如下：

1) 针对无线网络化控制系统中存在的能量限制问题，设计了功率感知事件触发策略与功率优化方案，通过降低通信能耗达到了节能目的，随后分析并证明了该设计下的闭环系统稳定性。通过数值仿真例子验证了方法的有效性。

2) 针对无线多跳网络控制系统中节点能量有限和通信时延问题，改进了传统路由规则，在路径选择时兼顾能量与时延考量，同时针对无法忽略的通信时延，设计了基于包的预测控制方法，保证了闭环系统的稳定性。通过仿真算例验证了方法的有效性。

3) 针对多个网络化系统共享多跳网络时存在的节点能量有限、通信路径冲突、时延分析困难等问题，通过建立多跳网络的数学模型明确描述了节点的工作与各通信链路，确立了该网络中时延的计算方式；设计了两种不同侧重的调度算

法来合理安排节点工作和通信链路，同时设计预测控制器以补偿调度无法消除的通信延时；随后在稳定性分析中证明了闭环系统的稳定。最后，通过数值仿真表明了上述设计的有效性。

**关键词：**无线多跳网络，协同设计，调度策略，预测控制，随机稳定

# **CODESIGN OF SCHEDULING AND CONTROL IN WIRELESS MULTI-HOP NETWORKED CONTROL SYSTEM**

## **ABSTRACT**

The networked control system is a closed-loop control system that connects sensors, controllers and actuators through a communication network. It is widely welcomed by its advantages of low cost, easy installation, easy expansion and easy maintenance. The wireless multi-hop network control system is a networked control system that uses wireless multi-hop networks for information communication. The wireless multi-hop network has smaller restrictions on deployment, wider application scenarios and stronger fault tolerance. The networked control system constructed by it has great potential application prospects, which is of great research significance and practical value.

Multi-hop networks introduce many new advantages to the control system, but also bring many new problems. The delay and packet loss problems that are common in networked control systems have more complex causes in multi-hop networks, which leads to greater analysis difficulty; multiple nodes bring multiple communication paths, which may cause conflicts when multiple systems communicate; In addition, the node energy is limited and cannot support the long-term high-frequency communication requirements of the control system. For these new problems that must be considered, the traditional control theory and processing methods are either inapplicable or conservative, which poses new challenges to the design and analysis of wireless multi-hop network control systems.

In this thesis, the problems of energy limitation, data error and communication delay in wireless multi-hop network control system are studied. The corresponding design ideas and analysis methods are proposed. The effectiveness of the proposed

method is verified by simulation. The main results of this thesis are as follows:

1) Aiming at the energy limitation problem in wireless networked control system, the power-aware event triggering strategy and power optimization scheme are designed. The energy-saving goal is achieved by reducing the communication energy consumption. Then the stability of the closed-loop system under the design is analyzed and proved. . The effectiveness of the method is verified by numerical simulation examples.

2) For the problem of node energy limitation and communication delay in wireless multi-hop network control system, the traditional routing rules are improved. The energy and delay considerations are taken into consideration in path selection. At the same time, packet-based design is designed for the communication delay that cannot be ignored. The predictive control method ensures the stability of the closed loop system. The effectiveness of the method is verified by simulation examples.

3) For the problem of limited node energy, communication path conflict and delay analysis when multi-hop networks are shared by multiple networked systems, the mathematical model of multi-hop network is used to clearly describe the working of nodes and communication links. The calculation method of delay in the network is established. Two different scheduling algorithms are designed to reasonably arrange the node work and communication link. At the same time, the predictive controller is designed to compensate the communication delay that the scheduling cannot eliminate. Then the stability analysis is carried out. The stability of the closed-loop system is demonstrated. Finally, numerical simulations show the effectiveness of the above design.

**KEY WORDS:** wireless multi-hop network, collaborative design, scheduling strategy, predictive control, random stability

## 目 录

摘 要 .....	I
ABSTRACT .....	III
目 录 .....	V
<b>第一章 绪 论</b> .....	1
1.1 课题研究背景及意义 .....	1
1.2 网络化控制系统概述 .....	2
1.2.1 网络化控制系统结构 .....	2
1.2.2 网络化控制系统中的典型问题 .....	2
1.3 国内外研究现状 .....	4
1.4 相关理论与背景介绍 .....	7
1.4.1 预测控制理论简介 .....	7
1.4.2 无线多跳网络简介 .....	8
1.5 研究目的 .....	9
1.6 本文主要内容与结构 .....	9
<b>第二章 无线网络化控制系统中事件触发策略与功率优化设计</b> .....	11
2.1 问题描述 .....	11
2.2 控制器设计与闭环系统 .....	13
2.2.1 事件触发机制设计 .....	13
2.2.2 功率优化设计 .....	14
2.2.3 采用智能控制器的闭环系统 .....	15
2.3 稳定性分析 .....	16
2.4 数值仿真 .....	19
2.5 本章小结 .....	20
<b>第三章 无线多跳网络控制系统中路由改进与预测控制器设计</b> .....	21
3.1 问题描述 .....	21

3.2 能量与时延感知路由与控制器设计 .....	23
3.2.1 能量与时延感知路由设计 .....	23
3.2.2 基于包的预测控制器设计 .....	24
3.3 稳定性分析 .....	24
3.4 数值仿真 .....	25
3.5 本章小结 .....	27
<b>第四章 无线多跳网络控制系统中调度策略与控制器协同设计 .....</b>	<b>28</b>
4.1 无线多跳网络控制系统建模和问题描述 .....	28
4.1.1 动态系统建模 .....	29
4.1.2 无线多跳网络建模 .....	29
4.1.3 问题描述 .....	30
4.2 网络调度与预测控制协同设计 .....	30
4.2.1 基于随机的调度策略 .....	31
4.2.2 基于系统误差界及优先级的调度策略 .....	31
4.3 控制器与执行器设计 .....	32
4.3.1 时延计算 .....	33
4.3.2 基于预测控制的控制器设计 .....	34
4.3.3 智能执行器设置 .....	35
4.4 闭环多跳网络化控制系统稳定性分析 .....	35
4.5 数值仿真 .....	39
4.6 本章小结 .....	40
<b>第五章 结论与展望 .....</b>	<b>42</b>
5.1 总结 .....	42
5.2 展望 .....	42
<b>参考文献 .....</b>	<b>44</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>48</b>
<b>作者简介 .....</b>	<b>49</b>
1 作者简历 .....	49
2 攻读硕士学位期间发表的学术论文 .....	49

3 参与的科研项目及获奖情况 .....	49
学位论文数据集 .....	50





# 第一章 绪 论

## 1.1 课题研究背景及意义

近几十年来,控制理论、通信技术和计算机技术得到了迅速的发展,这使得控制系统的设计更加自由,应用的场景越来越广泛。控制系统逐渐从传统的集中控制发展为远程控制,产生了网络化控制系统 NCSs (Networked Control Systems)。网络化控制系统结合了控制系统与通信网络,允许控制器、被控对象、执行器、传感器等部件在空间位置上分开布置,相互之间通过通信网络实现信息的单向或双向传输,以此构成完整的闭环系统。相较于传统的集中式控制系统,网络化控制系统可以将控制系统的各部分拆开并通过通信网络依旧保持闭环,这使得模块化控制器、执行器、传感器等成为了可能,于是网络化控制系统将会有更少的耦合,使得布置更容易、拓展能力更强、更换维护更加简单,降低了整个系统的设计成本并提高了整体的可靠性。这些优点使网络化控制系统已经在工业控制、智能电网、军事、医疗、交通等多个领域得到了广泛的应用。也因此受到了学者们的广泛关注和深入研究<sup>[1-6]</sup>。

网络化控制系统的优势来自于通信网络的引入,但同时整个系统就不可避免地需要考虑通信网络自身的特性与缺陷。网络自身存在多个参数,如传输速率、数据包长度、工作频率、网络带宽等,通常一个可以正常工作的通信网络有着一系列协议簇来规定这些参数的取值,而网络中不可避免的诱导时延、数据丢包、数据包乱序等现象也与这些参数的选取有关。而不同的网络必将存在各自的异同,例如,我们若根据是否有线连接来分类通信网络分成有线网络和无线网络,有线网络几乎无需考虑环境对信号的干扰,而无线网络的信号传输则受外部环境影响较大。由于两者存在的不同,基于不同网络的网络化控制系统也有所不同。由于有线网络技术的发展相对成熟,有线网络控制系统的应用也比较广泛,如现场总线系统等。但是线缆连接的方式使得其应用场景仍存在较大的限制。无线网络控制系统 WNCSs (Wireless Networked Control Systems) 采用无线网络代替传统的有线网络连接构成闭环控制系统,进一步打破了空间地理位置的限制,大大拓展了应用场景。随着无线技术的快速发展,无线通信的各项技术指标,如传输速率、误码率、安全性、传输距离等,都有着巨大的提升。因此,越来越多的研究转向了无线网络化控制系统。相比于有线网络,无线网络在带来优点的同时也存在着自身限制,如带宽、能量、

计算能力等资源受限,这些特点对在可靠性、实时性等方面有较高要求的控制系统将产生巨大的负面影响,这对新型的无线网络化控制系统设计提出了严峻的挑战,需要研究者探索新的分析方法、设计思路和控制理论来应对。

## 1.2 网络化控制系统概述

### 1.2.1 网络化控制系统结构

网络化控制系统是一种分布式反馈闭环控制系统<sup>[7, 8]</sup>,如图 1-1 所示为典型的网络化控制系统结构图。

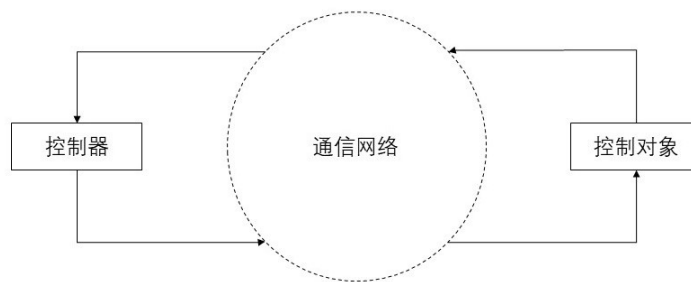


图1-1 网络化控制系统

Figure 1-1. Networked control system

图 1-1 中控制器与被控对象分处于不同地点,通过通信网络构成闭环。实际应用中,通信网络可承受的通信负载通常不限于单个控制系统,多个控制系统共享网络可以减少资源浪费。另一方面,随着计算机技术的发展,高性能的处理器允许一个控制器同时兼顾多个被控对象。充分利用资源减少成本也是网络化控制系统较传统集中式控制系统的优势之一。同时,如前文所述,网络自身的特性,如通信时延、数据包丢失等,可能会对控制系统的性能造成负面的影响,于是我们需要谨慎地挑选最适合控制系统的协议,然而,即便如此,这些缺陷也无法完全消去,若仍使用理想化的控制方法则对于要求较高的被控对象可能造成不可挽回的破坏,因而我们亟需研究适合网络化控制系统的控制理论和控制方法。同时我们也需要了解网络时延和丢包的出现原因<sup>[9, 10]</sup>。

### 1.2.2 网络化控制系统中的典型问题

网络化控制理论经过数十年的发展已经总结出了许多问题与解决办法,其中典型的问题有通信时延、数据包丢失、网络带宽有限等。

时延可以分为计算时延、传输时延和排队时延等。在当前条件下,高性能的微处理器能够使一个运行良好的控制系统的计算时延已经可以忽略不计。而传输时延则与信号在通信介质中的传播速度和数据包长度有关,控制系统所传递的信息,

包括传感器的测量信息和控制器的控制量，通常经过编码打包之后的数据包长度十分有限，另考虑到信号在通信介质中的传播速度极快，所以在大部分情况下，传输时延也可以忽略不计。而造成排队时延的原因不仅与网络的种类有关，在很大程度上更取决于网络协议的性质。比如随机退避类的协议是通信中较为常用的协议，但是这类协议会在原有网络基础上人为引入更多的随机性，同时导致不确定的时延，在高负载的情况下导致较大的时延。而确定性的协议会将网络时延固定在已知且有界的范围内，通常协议还允许规定接入优先级，为高优先级的任务提供更低的延迟，但这类确定性协议缺乏一定的灵活性，当网络空闲时，这类协议往往会额外增加通信的延时，而随机类的协议则能够克服这一点。控制系统一般要求较快速的信息交换，因此网络时延是不可忽视的影响。

针对网络存在的时延问题，根据时延的是否大于一个系统采样周期，可以将时延分类成长时延和短时延。在不同协议下，时延又可以分成常时延和随机时延<sup>[11-13]</sup>。为分析和解决时延问题，学者们通常使用以下几种解决方法：时延系统方法，该方法的思路是将网络化控制系统建模成为输入时延系统或者采样控制系统，之后通过时延系统的分析和设计方式得出保证系统稳定的最大时延上界；鲁棒控制方法，该方法把系统建模成不确定系统，通过不确定系统的分析和设计方式设计能够使系统稳定的控制器；随机控制方法，该方法适用于时延符合概率分布的情况，可以通过随机控制理论中的方式设计控制器保证系统的稳定。预测控制方法，该方法通常需要较为精确的系统模型，控制器通过模型计算未来多步的控制量，将其打包发送给执行器，执行器便可以在传输延迟没有收到当前控制量时，选取相应时刻的控制进行补偿，维持系统运行。然而，时延的产生原因十分复杂，仍需要根据实际情况合理地设计和分析。

数据包丢失同样有多种产生原因。在有线网络条件下，信号失真的情况较为罕见，但在无线通信条件下，无线通信介质极容易受到外界的干扰，导致接收到的信号失真，产生数据误码。在没有强有力的可靠纠错机制下，数据误码会导致整个数据包被主动废弃，导致数据包丢失。误码的发生受到信道带宽，噪声大小，数据包大小，传输功率等多种因素影响。除此之外，数据包丢失也与网络所选用的协议有着直接的关联。在许多协议下，数据包丢失是不同节点中网络重载缓冲区中通信量增加的结果，由于以太网解决分组冲突的方式，协议可能多次故意丢弃该数据包以免其他数据包受到冲突，因此发送节点将在给定数量的连续失败尝试之后停止尝试重新发送数据包。某些协议允许使用者自定义任务优先级，对于高优先级任务可以保证极少的丢包情况，但对于低优先级任务可能会长时间得不到发送机会。而某些将通信介质时分复用的协议能够几乎杜绝丢包情况，但是这将会大大增加前文所说的网络等待时延。对于控制系统来说，数据包的丢失意味着当前时刻的开环运

行，当丢包情况严重到一定地步时将威胁控制系统的正常运行。

当网络化控制系统发生丢包情况时，通常也有几种应对方式：置零，该方法的实现最为简单，当未接收到信号时，将输入置零，但这可能使系统状态发生跳变，造成不良影响；零阶保持，该方式保证了输入的持续性和平滑性，但无法应对长时间的丢包情况；预测补偿，与时延解决方式中的预测控制方式相同，在丢包时刻采用预测值工作，但预测步数受限于处理器的计算能力，且预测步数越多，其准确度越低。丢包的应对策略也应系统的实际情况分析并解决。

网络化控制系统中的另一个重要问题是网络带宽有限。网络化控制系统的一大优点通常可以使用已有的共享公共网络，从而减少布置成本。然而，在网络化控制系统的运行时，传感器需要时刻对外部进行数据采样、量化和编码并发送，控制器也需要根据反馈数据计算控制量并发送给执行器。通常每一个数据包的大小并不大，但若需要网络化控制系统达到较好性能，则需要尽可能地减少采样间隔，这会导致网络资源被长时间大量地占用，不仅会增加本身信息传输时的时延和丢包率，还会使得其他共享网络的用户的正常工作。因此，采取一定的算法减少控制系统传输信息对整个网络和自身系统的性能至关重要。网络与控制系统的协同设计也越来越被学者们重视和发展。

### 1.3 国内外研究现状

网络化控制系统受到了诸多学者的重视并进行了研究。对于网络化控制系统中普遍存在的时延问题，受到了研究者的广泛关注<sup>[14-18]</sup>。现有研究主要考虑其两个生成原因：传输距离和网络拥堵。传输距离是显而易见的影响因素，在给定的网络带宽、环境噪声、通信协议下，通信的距离越长，所需的传输时间越长，低于一个采样间隔的短时延较大于一个采样间隔的长时延更容易处理，对系统性能影响也会更小。因此，是否能够采取远程控制需要视所控系统的要求而定，对于实时性要求极高的系统来说，采取网络化控制形式是不合适的。另一方面，通信延迟也来自于排队时延，而排队时延成因是通信信道的有限带宽导致的网络流量拥塞。这意味着即使对于较短的传输距离，也可能产生长时延，同时由于排队情况的不确定性，导致难以对时延估算一个确定上界，增加了处理难度。因此，在考虑系统架构，选择控制策略和网络协议的阶段，应根据实际情况具体描述网络引起的延迟。

通常有以下几种时延的分类标准，时延是否时变，是否有统计规律，是否大于一个采样间隔。常数时延的时延方式通常是在网络节点处设置缓存器，将低于设置值的时延人为加长，这么做有利于之后的建模分析与控制器设计，但显然这牺牲了更多的系统性能。对于非常数时延，带有统计规律的随机时延适用于随机控制理论，

而对于无法得到内在规律的不确定时延，则需要研究者根据实际情况设计特定的控制器处理<sup>[19-21]</sup>。

在文献[22, 23]中，将线性网络化控制系统建模成时延系统，这些模型通常单一考虑反馈信道和反馈信道中的时延，或是将两个通道的时延归为一类统一考虑，之后构建 Lyapunov-Krasovskii 泛函，并根据要处理的问题推导出系统稳定性，性能，控制器或滤波器设计的所需条件，然而这些文献的处理方式并没有使用到时间戳功能，控制器增益与时延大小无关。而 Zheng 等人在研究中，采取了基于模糊模型的方法，将网络延迟与模糊规则联系起来，在设计控制器时将所有可能的时延变化考虑在内，那么无论实际时延大小是多少，通过模糊规则设计的控制器都能够保持系统运行的稳健<sup>[24]</sup>。同样使用模糊模型方法的还有文献[25]，但在该研究中，模糊规则基于与延迟相关的系统输出误差。该框架下使得系统的分析和控制器的设计更为简单，但得出的结论较为保守。此外，由于网络引起的延迟在很大程度上取决于变化的网络条件<sup>[26]</sup>，是一个未知的时变量，但是通常可以认为其前后有一定的联系，因此可以被建模成区间时变延迟<sup>[27, 28]</sup>和具有已知转移概率的马尔可夫链<sup>[29, 30]</sup>，或具有部分已知的转移概率<sup>[31]</sup>和任意切换的系统<sup>[32]</sup>。Xiao 等通过考虑有界的总时延将系统建成线性马尔科夫跳跃系统<sup>[33]</sup>，Zhang 等人扩展了该方法，通过两个马尔科夫链来描述前向和反馈双通道的时延<sup>[34]</sup>。这些研究者们研究了时延的形成原因，通过不同的方式解决时延对网络化控制系统的不良影响，然而，较为通用的理论往往会有较强的保守性，保守性小的成果大多适用范围也小，因此对时延的研究仍然具有重要意义。

随着网络化控制理论的发展，在设计可靠控制保证系统运行已经不再是难题，研究者们将目光放在了网络上。网络化控制系统需要新颖的设计机制来权衡控制和无线系统之间的相互作用，以实现最高的整体系统性能和效率<sup>[35-41]</sup>。传统的控制器设计方式基于十分可靠的传感器数据和控制命令的瞬时送达的假设。通信网络在数据传输中的使用必将引入非零延迟、数据包丢失和数据错误等。传输故障或截止期限未命中可能导致控制系统性能下降，甚至更严重的经济损失或降低人身安全。因此，控制系统设计需要包括容忍丢包和时延的机制。另一方面，无线网络设计需要考虑到控制系统的严格延迟和可靠性限制。例如，在 Willig 等人的研究中，时延取决于闭环系统的时间限制在几毫秒至几秒之间改变<sup>[42, 43]</sup>。此外，由于无线网络布置的灵活性，通信节点、传感器、执行器等可能并不通过电缆连接提供能源，导致了这些节点只能储存有限的能源，这对信息的传送带来了额外的限制<sup>[44-46]</sup>。然而，想要对无线网络进行调节和设置需要对网络有相当程度的了解，并且需要相应的协议作为载体实现设计。目前，如 WirelessHART 网络<sup>[47]</sup>，该网络有一系列可设置的实时调度算法与协议，已经被应用于许多控制与无线网络的联合设计当中。

协同设计的定义十分广泛,从不同的目标带来不同的设计方案。为了权衡网络与系统性能,二者的系统参数被联合优化。这些参数包括周期触发中的采样周期,控制系统中事件触发的触发阈值,网络物理层的传输功率和速率,MAC协议的访问参数和算法,占空比参数,多径通信中的路由路径等。这些问题的成因十分复杂,几乎不可能同时考虑所有的因素,因此现有的研究大多仅考虑这些参数中某几个组合的情况<sup>[48-53]</sup>。一些研究考虑了基于竞争协议的无线网络化控制系统,对无线网络中的时延和存在概率分布的丢包率进行建模,分析这些因素对控制系统的影响<sup>[54-57]</sup>。Rabi 等研究者设计了估计器旨在最小化状态估计的均方误差,其中假设无线网络中的时延和丢包是由于基于竞争的随机接入协议所引起,时延和丢包服从伯努利随机过程,均方误差则通过时延和丢包函数导出<sup>[55]</sup>。Park 等人则首先提出了一种可以优化采样周期和数据链路层参数的一般框架<sup>[54]</sup>。文章中假设了基于竞争的随机接入导致时延和丢包的简化模型,采用线性二次性能成本函数作为控制性能的度量,其优化目标是在给定时延和丢包率限制下最大化控制系统的性能。由于用于优化的目标函数表现形式十分复杂,文章最终通过基于数值迭代的方法计算结果。而文献<sup>[53]</sup>在文中提出了基于模型预测控制 MPC 方法的网络化控制系统在 IEEE 802.11 上的实现方法,作者侧重于控制角度处理问题,通过自适应的 MAC 参数调整和 MPC 来减少数据的延迟并提高系统的丢包上限。该方法可以在较为恶劣的无线信道条件下实现可靠且及时的数据传输来改善性能。

Bai 等人提出可一种特殊的无线网络化控制系统设计方法<sup>[48]</sup>。一方面, Bai 借鉴了类似文献<sup>[58]</sup>中的被动控制结构来保证系统的稳定性,另一方面,通过调整 IEEE 802.11 协议中的重传限制来优化整体 NCS 性能。在控制系统方面,作者基于被动性的架构来处理时延和丢包问题,这种被动架构会生成一个系统轨迹来跟踪和定义控制性能作为其绝对跟踪误差。此外,通过大量的仿真结果,构建出 IEEE 802.11 的重传限制与控制性能之间的凸关系。该协议中可以通过调整 MAC 参数来动态调整重传限制,作者基于该方式和之前揭示的重传与性能之间的关联,可以引入参数控制器以跟踪丢包和时延之间的最佳权衡,从而优化整体控制系统的性能。最后通过仿真结果表明,自适应的控制器可以收敛到合适的重传限制,从而优化控制系统的性能。Bai 等人研究了无线网络容量与控制系统延迟约束的效用最大化问题<sup>[59]</sup>。文中定义了效用函数为离散时间系统的均方根与连续时间对应系统的均方根的之比。假设被控对象遵循由控制器提供的参考轨迹运行,则可以证明效用函数是采样周期的凹函数且与离散化引起的跟踪误差成反比。作者通过一个冲突图来描述无线网络容量,图中每个顶点代表无线链路,若他们之间的链路互相干扰则有边连接,采样周期用来作为多跳端到端的上界。最终该文解决而最佳延迟界限问题,使效用最大化。

Alur 等提出了一种多跳网络控制系统的数学建模和分析框架<sup>[60]</sup>。通过一系列建模给出了多跳控制网络的语法和语义，提出了多跳控制网络到切换系统的转换方式。该方法综合考虑了控制系统、网络拓扑结构、路由、资源调度和传输错误。采用文中的模型分析了一个通信收到干扰的多跳网络化控制系统的鲁棒性，其中考虑了两种通信模型，即永久错误模型和瞬时错误模型，它们取决于通信中断的长度。通过对调度、路由和丢包的最坏情况的分析，以及对节点故障概率和丢包概率的稳定性分析，从多方面研究了多跳网络的鲁棒性。

无线网络化控制系统由于其资源受限问题，也为系统设计增加了挑战性<sup>[61-63]</sup>。与有线网络化控制系统不同，在无线网络化控制系统中各种控制组件往往需要通过电池供电，为了延长系统运行寿命，减少因电池能量耗尽而发生系统失稳等问题，高效能量使用前提下的控制设计就成为一个关键问题。举例来说，研究者在<sup>[64]</sup>设计了新颖的资源调度算法用以分配传输功率，并基于最大-最小模型预测控制方法确保系统的鲁棒性；有研究者针对无线网络化控制系统中存在的能源和时延限制问题，为兼顾能耗和系统性能提出了一种启发式算法设计框架，能够为功率控制和传输速率问题提供一种最优多项式时间算法，使得系统性能接近最优解<sup>[65]</sup>；Tiberi 等在无线传感器网络场景中通过自触发采样方式节省大量通信资源，增加节点睡眠时间，并确保所需控制性能<sup>[66]</sup>；也有文献考虑共享无线介质的多个系统场景下存在信道干扰和功率分配的问题，制定了信道感知调度方法和功率分配机制，通过一个集中式的调度器决定控制任务的访问时间，能够在满足信道条件下同时获得优良的系统性能并最小化总功率开销<sup>[67]</sup>；而 Wang 等人考虑了一类功率资源受限的网络化控制系统，通过有效分配通信信道和传输功率来稳定系统<sup>[68]</sup>，如此等等。这些研究对网络化控制系统在节能前提下保证系统性能提出了各种解决方案，但现有研究较少的结合节点休眠和降低传输功率这两种方法，所得到的结果因此带有相当的保守性。

## 1.4 相关理论与背景介绍

### 1.4.1 预测控制理论简介

预测控制理论产生于 20 世纪 70 年代，相较于其他传统的控制方法，预测控制是一门起步较晚的理论。预测控制的兴起来源于社会的发展和工业水平的进步，工业界此前已经大规模应用 PID 作为过程控制的手段，由于 PID 有极强的泛用性，适用于线性和非线性过程，无需事先建立数学模型，参数易于调节，操作简单，受到工业界的广泛欢迎。但产品要求越来越高时，由于缺乏对动态过程的精确了解无法有方向性地进一步优化生产质量，PID 便开始无法满足要求。预测控制理论便在

此时开始得到越来越多的应用和研究。最先由工业控制发展而来的预测控制理论有动态矩阵控制等,该方法适用于渐进稳定的线性系统,这是一种基于阶跃响应的非参数模型,避免了辨识最小化参数模型的困难,工作时,通过在线不断地滚动优化取代传统的全局单次优化,提高了系统的鲁棒性。但是这些非参数化的控制方法在应用中还需依靠大量经验积累。之后对预测控制的深入研究发展了一大批成熟的理论,参数化模型却带了非参数化模型也成为了预测控制理论的主流,20世纪90年代以来出现的预测控制制定性综合理论更使得理论研究出现了巨大的飞跃,到目前,预测控制已经称为一个包含许多分支的研究方向,是一门十分具有代表性的先进控制算法。

预测控制是一种基于模型的控制理论,该模型通常被称为预测模型。预测模型需要具有展示系统未来动态行为的功能,即通过被控对象的历史信息和未来输入预测其未来的状态和输出,并进而计算性能指标等。这是理论分析所要求的必须部分,但理论并没有限制模型的表现形式,模型可以是频域描述的传递函数也可以是时域描述的状态空间方程,甚至是非参数化的模型例如动态矩阵控制中的阶跃响应模型等等,只要是具备了预测功能,均可以作为预测模型进行分析。由于模型可以预测系统未来的状态和输出,便可以使得研究者可以通过建立性能指标等方式作为结果的展示,即有了比较不同控制策略优劣的手段。之后,便可以根据一定的约束和目标进行优化,因此,预测模型是实现该理论的前提和基础。

预测控制的一大特点在于优化,它可以通过建立某一包含系统未来状态信息的性能指标,并通过求解最优来确定未来的控制行为。预测控制中的优化是滚动优化,是一种在线的反复优化方式。这也是预测控制与传统的最优控制理论最大的差异所在,预测控制一般采用有限时域、滚动式的优化策略,意味着它并不是采用全局的优化指标,而是在每一时刻有一个相对该时刻的优化指标,这些指标相对形式相同,但是包含具体时间区间的差别。在理想情况下,全局策略可以得到全局最优解,而有限时域策略只能得到次优,但是在实际应用中,往往存在辨识精度不高、环境干扰等不确定因素,离线全局优化显然无法应对这些情况,而滚动优化是基于当前时刻的基础上进行优化求解,能够及时弥补对系统性能的不利影响,因而在实际应用中,滚动优化策略更受欢迎。

#### 1.4.2 无线多跳网络简介

无线网络按传递信息所经过的转发次数可以分为无线单跳网络和多跳网络,传统的无线局域网 WLAN (Wireless Local Area Network),每个用户均要通过无线链路与一个固定的接入点 AP (Access Point) 相连,相互通信需要通过该接入点完成。这意味着该局域网中的所有信息处理均要通过一个 AP,一方面有限的带宽将限制局域网中的用户数量,另一方面加重了接入点的通信压力。无线多跳网络则允



许任何无线设备节点同时作为 AP 和路由器，网络中的每个节点都可以发送和接收信号，每个节点都可以与一个或者多个对等节点进行直接通信。对比单跳网络，多跳网络更容易部署、更加节省带宽资源、自组织能力和容错性更强。

无线 ad hoc 网络、无线传感器网络、无线 mesh 网络等是较为典型的无线多跳网络。无线 ad hoc 网络由一组能够无线通信的移动节点组成，网络中所有节点的空间位置可以自由移动，地位平等，无需其他基础通信设施，可以快速构建，是一个临时的多跳且无中心节点的网络。无线传感器网络则是一组在空间中静态分布的传感器节点组成，这些节点同时具备传感器收集与采样功能，通常传感器网络会将这些节点分成传感节点和网关节点，传感节点收集信息发送给网关节点，而网关节点进一步将其发送给区域外的接收者。这么做可以显著的节省传感节点的能源，从而可以扩大整个网路的分布区域。无线 mesh 网络则是一种网状网络，网状网络具有极强的容错性，因为其每个节点可以与所有通信范围内的节点进行通信，通常个别节点不能工作并不会影响整个网络的生存。对比单跳网络，多跳通信网络的通信更加灵活、应用场景更加广阔，去中心的设计使得网络可以更加简单地拓展，扩大覆盖范围；此外，多跳通信网络中每跳的距离较短，发送数据的功率也较小，因此更加节能；同时，由于工作功率较低，节点间距离较近使得无线信号之间的干扰也较小，提高了网络的信道质量。高质量的通信和可靠的环境使得无线多跳网络十分适合于网络化控制系统。

## 1.5 研究目的

无线多跳网络有着其他类型的无线网络不具备的诸多优点，无线多跳网络化控制系统也吸引了许多研究者的关注，然而，目前相关的论文与研究十分有限，远少于其余类型的网络化控制系统。本文希望能够在无线多跳网络化控制系统的设计与分析方面进行一些探索。

无线多跳网络给网络化控制系统的设计带来了诸多挑战，由于多跳网络中存在更多的有限资源，因此在设计相应的网络化控制系统时必须更加关注网络资源的合理利用，传统的设计方式和控制理论难以胜任。本文希望将协同设计思想应用于无线多跳网络控制系统设计中，以兼顾网络与系统各自的需求。

## 1.6 本文主要内容与结构

本文主要研究了无线多跳网路控制系统中的网络资源与控制算法协同设计方法。正文的每个章节着眼于通信网络中存在的不同问题和对系统造成的不同影响，

在协同设计的思想下，针对性地提出了包含网络设计与控制算法设计的解决方案，在合理利用有限的网络资源的情况下有效地保证系统性能。全文的组织结构如下：

第一章绪论部分介绍了网络化控制系统的研究背景和意义，对网络化控制系统做了简要概述，之后对部分国内外研究现状进行了综述，并简要介绍了本文用到的预测控制理论与无线网络相关背景，最后简述了本文的研究目的。

第二章着眼于无线通信存在的通信误码和无线节点能源有限问题，设计了基于功率感知的事件触发策略并对其稳定性作了分析研究。文中通过误码率将丢包率和发送功率建立联系，分析丢包对系统造成的影响，通过设计事件触发减少通信数量并提出了设计方法优化网络节能并保证系统性能。通过数值仿真验证了方法的有效性。

第三章考虑了如何合理分配通信路径并在此基础上保证控制系统稳定问题，改进了路由协议使其能够兼顾节点能量与通信时延，同时，针对不确定时延问题，设计了基于包的预测控制器使其保持稳定。通过数值仿真算例验证了方法的有效性。

第四章设计了两种调度策略解决多个系统共享多跳网络时的竞争和节点能量有限问题，并根据预测控制思想设计了控制器补偿通信时延使各系统保持稳定。本章建模分析了多跳网络中时延的产生因素，对多系统如何分配通信路径问题和节点节能问题提出了一种保证公平性的随机策略和一种根据每个系统运行状况判断优先级的协同策略，在随机策略中通过设计预测控制器补偿时延带来的不良影响，在协同策略中，设计了包含预测控制的性能指标，通过对该指标的最优解得搜索可以达到网络资源与系统性能之间权衡。通过仿真例子验证了方法的有效性。

最后本文在第五章对全文内容进行总结，并且对本文的研究不足和未来研究方向提出了几点展望。

## 第二章 无线网络化控制系统中事件触发策略与功率优化设计

本章研究一类存在通信误码的无线网络化控制系统的通信节点节能和控制系统性能间的平衡问题, 对此设计了功率感知事件触发策略和功率优化, 并对该闭环系统稳定性进行了研究。在无线网络控制系统中, 通信设备能量有限的是一个值得关注的问题。当通信节点能源耗尽时, 依赖无线网络进行信息传递的系统可能出现信号无法收发进而无法工作的情况。此外, 无线通信受环境干扰存在数据误码问题, 以此建立的无线网络化控制系统的传感器到控制器和控制器到执行器的通信均受随机误码影响, 从而影响系统性能。本章根据误码与丢包的数学模型, 建立了传输功率和系统性能之间的联系。从节能角度出发, 设计了事件触发规则, 减少节点工作次数, 同时出于不增加传感器额外设备以降低成本考虑, 将事件触发器设置在控制器处; 之后, 设计了功率优化函数, 在保证系统性能的前提下尽可能减少节点传输功率, 给出了期望意义下的系统稳定条件。

### 2.1 问题描述

考虑如图 2-1 所示的无线网络化控制系统, 其中从传感器到控制器和从控制器到执行器的通信链路均由某无线通信网络闭合。设受控对象由如下线性定常离散系统模型描述:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (2-1)$$

其中  $x(k) \in \mathbb{R}^n$ ,  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $u(k) \in \mathbb{R}^m$ 。

一方面, 从控制系统的角度看, 使用无线通信网络进行采样数据和控制数据的传输意味着准确实时的信号传输不再得到保证。与传统有线网络化控制系统不同, 无线通信下的网络化控制系统一般规模较小, 因而时延在其中的往往并不起决定性作用, 而且由于控制系统实时性要求, 延误的数据包一般也会主动丢弃, 因而在本文中主要考虑无线通信网络造成的数据包的丢失的影响。

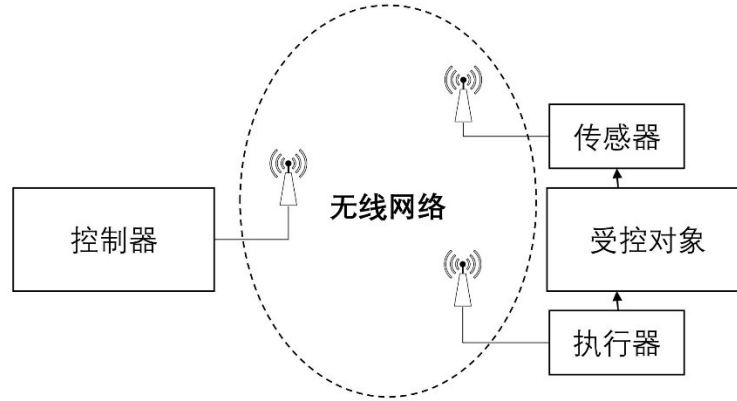


图2-1 无线网络化控制系统示意图

Figure 2-1. Diagram for wireless networked control systems

记  $\rho(k) = \rho_{sc}(k)\rho_{ca}(k)$  为  $k$  时刻信息传输结果:  $\rho(k) = 1$  表示传输成功, 反之  $\rho(k) = 0$  表示传输失败。其中  $\rho_{sc}(k), \rho_{ca}(k)$  分别是传感器到控制器端和控制器端到执行器端的传输结果, 其含义如  $\rho(k)$  类似定义并假设两者是相互独立的。记  $p(k)$  为  $\rho(k)$  的发生概率, 该概率假设为与时间无显式依赖关系, 即  $p(k) = p, \forall k$ , 则

$$\Pr\{\rho(k)\} = \begin{cases} p & \rho(k) = 1 \\ 1-p & \rho(k) = 0 \end{cases} \quad (2-2)$$

其中  $p = p_{sc}p_{ca}$ , 分别是  $\rho_{sc}, \rho_{ca}$  发生概率。

由式(2-2), 在存在无线通信网络导致的丢包情况下实际的控制量为:

$$u(k) = \rho(k)u_o(k) \quad (2-3)$$

其中  $u_o(k)$  是控制器本身生成的控制量。

另一方面, 从通信网络的角度看, 无线通信网络中的丢包主要由无线信道干扰带来的数据误码所致。误码的出现破坏了数据包的完整性, 将会被主动丢弃, 在控制系统的实时性要求下该数据包一般会放弃重传, 从而导致丢包。误码的发生受信道带宽, 噪声大小, 数据包大小, 传输功率等因素影响, 若给定无线网络相关参数, 误码的发生概率, 即误码率, 记为 SER, 可近似为发送功率  $\sigma$  的函数:

$$\text{SER} \approx e^{-\nu\sigma} \quad (2-4)$$

其中  $\nu$  是与数据包大小、信道带宽、噪声功率等网络参数相关的系数。

注意到无线通信网络的误码率 SER 和无线网络化控制系统的丢包率  $p$  代表的近乎同一概念, 由式(2-2)和(2-4) 则可得到如下的丢包率和传输功率之间的关系:

$$q = 1 - p \approx e^{-\nu\sigma} \quad (2-5)$$

闭环系统为提升控制系统性能, 应尽量减少丢包概率  $1-p$ ; 而由(2-5), 减小丢包概率意味着增大传输功率  $\sigma$ , 从而增大系统能耗: 如何在其中进行折中就是

值得研究的一个问题。对这个问题的解决引出了本文所提出的基于事件触发的智能控制器设计和相应的优化分析。

## 2.2 控制器设计与闭环系统

为最大化网络生存周期,针对所考虑的系统设计如图 2-2 所示的基于事件触发的智能控制器。该智能控制器可实现控制计算、事件触发和功率优化三个功能。其中控制计算由如下的状态反馈控制器实现:

$$u_0(k) = Kx(k) \quad (2-6)$$

下面分别讨论事件触发机制的设计,功率优化的设计和相应的闭环系统。

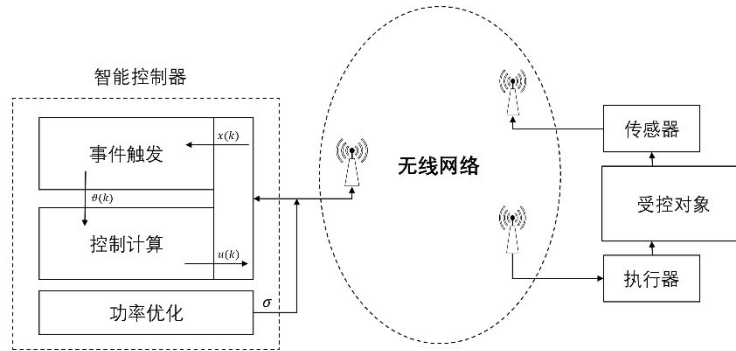


图2-2 带有智能控制器的网络化控制系统

Figure 2-2. Networked control system with intelligent controller

### 2.2.1 事件触发机制设计

考虑到系统李雅普诺夫函数随时间的变化可以作为该系统运行状态的一种表征,我们将其作为事件触发规则中的比较量。只需合理设置触发条件,便可以保证系统运行不超出预期。

定义李雅普诺夫函数  $V(x(k)) \triangleq x^T(k)Px(k)$ , 其中  $P$  为正定对称矩阵。并以如下符号:

$$\begin{aligned} V_c(x(k+m)) &\triangleq V((A+BK)^m x(k)) \\ V_o(x(k+m)) &\triangleq V(A^m x(k)) \\ V_h(x(k+m)) &\triangleq V((A^m + \sum_{i=0}^{m-1} A^i BK)x(k)) \end{aligned} \quad (2-7)$$

分别表示表示  $m$  次系统闭环、开环、零阶保持周期后系统的李雅普诺夫函数。

对于事件触发有以下考虑。我们需要用事件触发放宽周期触发的要求,牺牲部分性能为节能创造条件。为了减少通信节点工作次数,我们人为增加了系统相邻两次的闭环间隔,因此,事件触发器将最近一次系统闭环时刻状态的  $\delta V(x(k_s))$  作为

触发阈值。同时,若原系统是一个开环不稳定的系统,丢包会导致被控对象失去控制量之后出现发散,人为设计的事件触发更可能加剧该情况,因此,为了使被控对象的状态较为平稳变化,执行器需要进行一段时间 $h_0$ 的零阶保持,同样也允许取 $h_0 = 0$ ,相当于取消该功能。考虑到零阶保持可以维持一段时间的系统性能,在此期间,事件触发器不工作。同样出于系统性能的考虑,为了不使得系统两次闭环间隔过大,在计算触发时,引入对未来时刻状态的开环预测,若未来 $m_0$ 步之内有预测量达到阈值便触发,这将大大减少两次触发间隔。

基于上述考虑,设计触发规则如下:

$$\exists V_o(\bar{x}(k+m_0)|x(k)) \geq \delta V(x(k_s)), k > k_s + h_0 \quad (2-8)$$

其中, $k_s$ 是离当前时刻 $k$ 最近的上一系统闭环时刻,不妨设为第 $s$ 次, $V_o(\bar{x}(k+m_0)|x(k)) \triangleq V(A^{m_0}x(k))$ 是 $k$ 时刻的控制器对接下来系 $m_0, m_0 \in \mathbb{N}$ 次开环运行周期后状态值的预测, $\delta \in \mathbb{R}^+$ 为正实数系数, $h_0$ 则是执行器零阶保持的步数。 $m_0, h_0$ 在系统运行之前就将确定并设置于控制器和执行器处。

在此规则之下,由于存在数据丢失的可能性,控制器仅在收到传感器反馈时才开始工作。工作时,控制器首先判断当前时刻执行器是否为零阶保持状态,再通过反馈状态量与系统模型向前预测未来状态,并使用该预测状态的李雅普诺夫函数与上一次闭环时刻作对比,判断是否满足触发条件。仅在当前时刻不处于零阶保持状态,且满足触发条件(2-8)时,才构成触发。

### 2.2.2 功率优化设计

在通过设计触发规则(2-8)来减少传输次数的基础上,适当降低传输功率可以进一步实现节能效果。然而,传输功率影响到丢包率,一味地降低传输功率可能导致系统性能下降甚至无法稳定。前文的控制律设计也对丢包率提出了一定的限制要求。我们分析闭环系统稳定性发现,系统性能与事件触发规则中的参数以及传输功率有关,这些参数在系统矩阵 $A, B, K$ 等确定的情况下,有各自的限制范围,在限制条件下改变它们的取值能够改变系统的期望衰减率 $\xi$ ,却不会改变稳定性的表示形式。这意味着我们可以设置一个衰减率上界 $\xi_0$ 并构建一个性能指标来优化这些参数和传输功率的取值,达到以较低的传输功率得到较好系统性能的目的。

更为有效的节能方案可通过求解以下优化问题得到:

$$\begin{aligned}
 \min_{\sigma, \frac{1}{\delta}} J &= c_1 \xi + c_2 \sigma + \frac{c_3}{\delta} \\
 \text{s.t. } p &= 1 - e^{-v\sigma} \\
 0 &< q\gamma < 1 \\
 0 &< \delta \leq \xi \leq \xi_0 \\
 0 &\leq \sigma \leq \sigma_0
 \end{aligned} \tag{2-9}$$

其中系统期望衰减率为  $\xi = \frac{p}{1-q\gamma} \delta$ 。

以上优化问题考虑了节能和系统性能之间的矛盾。出于节能考虑，我们希望传输功率  $\sigma$  尽可能小，并且触发系数  $\delta$  尽可能大。而系统性能则要求  $\xi$  在可接受的系统衰减率的上界  $\xi_0$  的限制下尽可能小。通过求解该非线性规划问题，可以得到在权重系数  $c_1, c_2, c_3 \in \mathbb{R}^+$  下的最优  $\sigma, \delta$ 。在满足  $\xi < \xi_0$  的同时，最大化触发阈值  $\delta$  减少控制器端的信号发送次数，最小化发送功率  $\sigma$  降低每次节点工作的能耗。其中，权重系数代表了问题中各个参数的重要性，我们可以根据实际需要进行调整。

### 2.2.3 采用智能控制器的闭环系统

根据上述设计， $k \in [k_s, k_{s+1})$  时的控制律可改写为：

$$u(k) = \begin{cases} u_o(k_s) & k \in [k_s, k_s + h_0] \\ \rho(k) \mathcal{G}(k) u_o(k) & k \in (k_s + h_0, k_{s+1}) \end{cases} \tag{2-10}$$

其中  $k_s$  表示第  $s$  次系统闭环时刻， $\mathcal{G}(k)$  是触发情况的指示性函数：若满足触发条件，则  $\mathcal{G}(k) = 1$ ；否则  $\mathcal{G}(k) = 0$ 。

事件触发对原闭环系统进行了进一步的改造，将原来双通道中的相互独立的数据传输行为建立了条件关系。即事件触发和控制量计算依赖于传感器至控制器的数据成功传输，事件触发则影响了控制器的信号发送情况。相应的系统闭环条件也发生了改变。

定义事件  $\varepsilon(k)$  表示  $k$  时刻系统处于闭环运行，即在此刻传感器将状态成功反馈至控制器，同时事件触发器被触发，最后执行器成功收到控制量。那么， $\Pr\{\varepsilon(k)\} = \Pr\{\rho(k) = 1, \mathcal{G}(k) = 1\} = p \Pr\{\mathcal{G}(k) = 1 \mid \rho_{sc}(k) = 1\}$ 。

在该机制下的闭环系统，无需在传感器端增加额外的计算和存储设备，仅需要在控制器处增加部分计算，即可达到节能目的。虽然无法控制反馈通道的工作情况，但可以大大减少前向通道的通信次数。此外，本文还通过功率优化，进一步达到节能的效果。

## 2.3 稳定性分析

有如下闭环系统稳定性结论。

**定理 2.1** 考虑采用智能控制器(2-10)的闭环系统。如果存在矩阵  $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ，正定对称矩阵  $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$  和标量  $\beta, \delta \in (0, 1), \gamma \in (1, \infty), h_0 \in \mathbb{N}^+$  使得下面的不等式成立：

$$\begin{aligned} (A+BK)^T P(A+BK) &\leq \beta P \\ A^T P A &\leq \gamma P \end{aligned} \quad (2-11)$$

$$(A^{h_0} + \sum_{i=0}^{h_0} A^i BK)^T P (A^{h_0} + \sum_{i=0}^{h_0} A^i BK) \leq \delta P$$

其中  $h_0 = \max\{h \mid (A^h + \sum_{i=0}^h A^i BK)^T P (A^h + \sum_{i=0}^h A^i BK) \leq \delta P\}$ ，则可以通过调节通信网络的发送功率  $\sigma$ 、触发参数  $\delta$ 、预测窗口长度  $m_0$ ，使得对某正实数  $\xi < 1$  闭环系统稳定，且

$$E\{\|x(k)\|^2\} < \xi^{s+1} \lambda_{\max}(P) / \lambda_{\min}(P) \|x(0)\|^2 \quad (2-12)$$

其中  $k > 0, k \in (k_s, k_s + 1]$ ， $k_s$  表示第  $s$  次闭环时刻， $\lambda_{\max}(P), \lambda_{\min}(P)$  分别表示  $P$  的最大与最小特征值。

**证明** 为证明闭环系统在本文的触发条件(2-8)下稳定，只需证明任意的连续两次系统闭环时的李雅普诺夫函数递减，并在时间趋于无穷时，李雅普诺夫函数趋于零。

根据前文的设计，我们可以将两次闭环之间的系统行为分为闭环阶段，零阶保持阶段，开环阶段。不妨假设在  $k_s$  时刻系统处于闭环，即事件  $\varepsilon(k_s)$  发生。则有

$$x(k_s + 1) = (A + BK)x(k_s) \quad (2-13)$$

由(2-11)可得， $k = k_s + 1$ ，系统满足

$$V(x(k)) \leq \beta V(x(k_s)) \quad (2-14)$$

当系统处于零阶保持阶段  $(k_s, k_s + h_0]$ ，执行器维持零阶保持器输入，则有

$$x(k) = (A^{k-k_s} + \sum_{i=0}^{k-k_s} A^i BK)x(k_s) \quad (2-15)$$

同理，根据(2-11)， $k \in (k_s, k_s + h_0]$ ，系统满足

$$V(x(k)) \leq \delta V(x(k_s)) \quad (2-16)$$

此后，执行器已经不再执行零阶保持，控制器端若收到反馈也将开始判断是否触发。然而，以上均只保证了左式的上界，并且由于  $h_0$  是事先确定的与  $k$  无关的满足式(2-11)的常数，因此只能给出  $V(x(k_s + h_0))$  的一个非常保守的上界。这意味着实



际系统运行至  $k_s + h_0$  时刻时,  $V(x(k_s + h_0))$  与  $\delta V(x(k_s))$  可能仍有差距。

因此, 触发器在  $k_s + h_0$  时刻未达触发条件, 系统存在一段时间的开环运行期。假设存在一个常数  $\delta_s \leq \delta$  使得下面等式成立:

$$V_h(x(k_s + h_0) | x(k_s)) = \delta_s V(x(k_s)) \quad (2-17)$$

并且事件触发条件将在  $k_s + h_0 + n_s + 1$  时刻激活, 存在

$$\begin{aligned} & V_o(x(k_s + h_0 + n_s) | x(k_s + h_0)) \\ & \leq \delta V(x(k_s)) \\ & < V_o(x(k_s + h_0 + n_s + 1) | x(k_s + h_0)) \end{aligned} \quad (2-18)$$

为减小开环对系统性能产生的不利影响, 在事件触发设计中, 我们通过调整预测窗口的大小来改变原有开环步数  $n_s$ , 新的开环次数  $[n_s - m_0]^+ \triangleq \max\{n_s - m_0, 0\}$ 。

当  $k \in (k_s + h_0, k_s + h_s]$ ,  $h_s = h_0 + [n_s - m_0]^+$ , 在此期间, 假设存在一个常数  $\delta_s \leq \delta_{s, m_0} \leq \delta$  使得下面等式成立:

$$V(x(k)) = \delta_{m_0, s} V(x(k_s)) \leq \delta V(x(k_s)) \quad (2-19)$$

以上分析证明, 系统虽然经过了一段时间的零阶保持和一段时间的开环运行, 但都能保证系统性能处于合理预期之下。当  $k \in (k_s, k_s + h_s]$ , 即使  $\rho_{sc}(k) = 1$ , 触发器也不会触发  $\Pr\{\mathcal{G}(k)=1 | x(k_s), \rho_{sc}(k)=1\} = 0$ 。因此, 这段时间内, 系统的行为不存在随机性,  $E\{V(\cdot) | x(k_s)\} = V(\cdot)$ 。而在这之后的时刻, 触发条件将被满足  $\Pr\{\mathcal{G}(k)=1 | x(k_s), \rho_{sc}(k)=1\} = 1$ , 系统闭环与否取决于通信时是否出现丢包, 我们需要用期望来描述系统状态。

不妨假设  $k_s$  之后的下一闭环时刻为  $k_{s+1}$ , 考虑  $k \in (k_s + h_s, k_{s+1}]$ , 有

$$\begin{aligned} & E\{V(x(k_{s+1})) | x(k_s)\} \\ & = \sum_{k=k_s+h_s+1}^{\infty} \Pr\{\varepsilon(k) | x(k_s)\} E\{V(k) | x(k_s), \varepsilon(k)\} \\ & \leq \sum_{k=k_s+h_s+1}^{\infty} pq^{k-k_s-h_s} \gamma^{k-k_s-h_s} \delta V(x(k_s)) \\ & \leq \sum_{k=k_s+h_s+1}^{\infty} p(q\gamma)^{k-k_s-h_s} \delta V(x(k_s)) \\ & = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{(1-(q\gamma)^r)}{1-q\gamma} p \delta V(x(k_s)) \end{aligned} \quad (2-20)$$

由上式可以看出, 只需通过合理取值  $p$ , 来保证  $q\gamma < 1$ , 上式便可收敛。令

$$\xi = \frac{p}{1-q\gamma} \delta, \text{ 有}$$

$$E\{V(x(k_{s+1})) | x(k_s)\} < \xi V(x(k_s)) \quad (2-21)$$

其中  $\frac{p}{1-q\gamma}$  是  $p$  的递减函数, 因此  $\xi \geq \delta$ 。此外, 我们同样可以通过合理选取参数值使得  $\xi < 1$ 。

至此, 我们证明了相邻闭环时刻之间系统的李雅普诺夫函数呈递减关系, 还需讨论两个闭环时刻间  $k \in (k_s, k_{s+1})$  时系统的期望运行情况。根据式(2-15),  $k \in (k_s + h_0, k_s + h_s]$ ,  $V(x(k)) = \delta_{m_0, s} V(x(k_s)) \leq \delta V(x(k_s))$ 。当  $k \in (k_s, k_{s+1})$ , 有

$$\begin{aligned} & E\{V(x(k)) | x(k_s), \varepsilon(k_{s+1})\} \\ & \leq pq^{k_{s+1}-k_s-h_s} \gamma^{k-k_s-h_s} \delta V(x(k_s)) \\ & < E\{V(x(k_{s+1})) | x(k_s)\} \\ & < \xi V(x(k_s)) \end{aligned} \quad (2-22)$$

综上所述, 对于闭环系统, 当系统矩阵  $A, B$  确定后, 可以通过适当选取参数  $q, \gamma, \xi < 1$ , 即可保证其在任意相邻的两次闭环时刻间内

$$E\{V(x(k)) | x(k_s)\} < \xi V(x(k_s)), k \in (k_s, k_{s+1}] \quad (2-23)$$

对两侧同时取期望, 则

$$E\{V(x(k))\} < \xi E\{V(x(k_s))\}, k \in (k_s, k_{s+1}] \quad (2-24)$$

递推可以得到:

$$E\{V(x(k))\} < \xi E\{V(x(k_s))\} < \dots < \xi^{s+1} V(x(0)) \quad (2-25)$$

进一步地, 将李雅普诺夫函数进行适当放缩, 即可证明对于闭环系统, 对于任意  $k > 0$ , 有

$$E\{\|x(k)\|^2\} < \xi^{s+1} \lambda_{\max}(P) / \lambda_{\min}(P) \|x(0)\|^2 \quad (2-26)$$

其中  $P$  是李雅普诺夫函数中的正定对称矩阵,  $\lambda_{\max}(P), \lambda_{\min}(P)$  分别表示  $P$  的最大与最小特征值。定理得证。

## 2.4 数值仿真

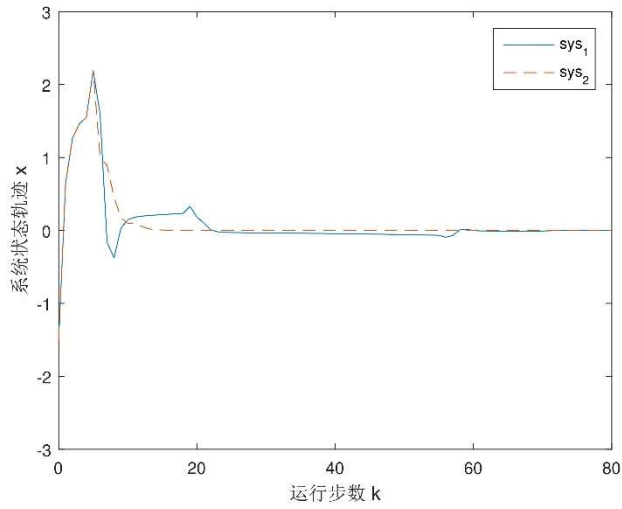


图2-3 两种控制器下的系统状态轨迹

Figure 2-3. State trajectory of two controllers

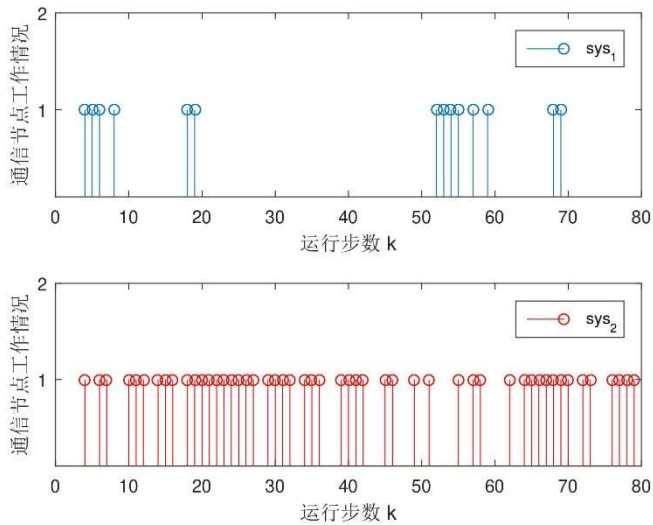


图2-4 (a) 事件触发规则下的节点通信次数 (b) 非事件触发下的节点通信次数

Figure 2-4. (a) Number of node communication operations with event trigger (b) Number of node communication operations without event trigger

考虑系统(2-1)并取如下系统矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.8 \\ -0.2 & 1.2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -0.4 \\ 0.6 \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

初始状态设为  $x_0 = [1.5, 1]^T$ 。注意到本文设计的智能控制器没有限制控制器的具体设计方式，在本例中采用最优控制方法得到系统反馈增益

$K = [0.2166, -1.0008]$ 。根据  $A, B, K$  确定  $\beta = 0.3496$ ,  $\gamma = 1.2331$ 。取  $\xi_0 = 0.6$ , 预测窗口长度  $m_0 = 1$ 。通过求解功率优化问题, 可以得到发送成功率为  $p = 0.6442$ , 触发系数  $\delta = 0.43$ , 期望衰减率为 0.4851。

我们将本文设计的带有事件触发和功率优化的系统设置为  $\text{sys}_1$ , 而仅采用同样最优控制器的系统  $\text{sys}_2$  作为对照组。图 2-3 比较了两种系统的状态轨迹情况, 图 2-4 展示了各自的网络节点工作情况。

从图 2-3 中可以发现, 两个系统均能够较快趋于稳定。虚线代表的非事件触发的最优控制系统效果更好, 因为事件触发牺牲了部分性能来满足节能要求。实线代表本文设计的系统, 在趋于平衡点之后会有小幅偏差, 是由于零阶保持和开环阶段导致, 在下一次触发之后, 系统将重新趋于稳定。

结合以上两幅图, 对比智能控制器下的系统性能较最优控制器下的系统性能, 前者为了兼顾节能牺牲了部分性能但二者差距不大, 仍可以满足需求。而在节能方面, 前者触发次数为 18 次, 远少于后者的 50 次, 节能效果十分明显。综上所述, 智能控制器的设计能成功地在维持系统性能的前提下节省网络资源。

## 2.5 本章小结

本章针对无线网络化控制系统中数据误码和能量限制问题, 设计了功率感知事件触发策略和功率优化, 并对其闭环系统进行了稳定性分析。文中考虑了无线网络化控制系统中设备能量有限问题, 通过数据误码率公式将发送功率与丢包率联系起来, 设计了事件触发规则减少发送次数, 设计了优化函数优化发送功率, 通过分析证明了闭环系统稳定。通过数值仿真例子验证了方法的有效性。后续将考虑在更贴近实际的假设下的功率优化方法和在功率优化策略下的控制器设计等问题。

### 第三章 无线多跳网络控制系统中路由改进与预测控制器设计

在前一章中，我们设计了无线网络中的节能方法并通过优化提升节能效果与控制系统性能，但在考虑网络属性时并未突出多跳网络的特性。在本章中初步考虑了多跳网络的性能特点，针对节点能量有限和通信时延问题，根据协同思想改进了传统路由，并设计有效的预测控制器解决网络时延带来的问题。在多跳网络中，通信路径由多个节点组成，追求低通信时延的网络化控制系统将会长期占用统一通信路径，然而，如若特定区域节点同时耗尽能源可能会导致网络分块甚至瘫痪。在本章节中，通过改进传统的路由方法，将节点剩余能量和通信时延同时纳入考虑因素，使得每一次通信能够兼顾节点剩余能量与通信时延，对不可避免的非零时延则针对性地设计了基于包的预测控制方法，保证网络化控制系统仍能够正常有效地工作。

#### 3.1 问题描述

考虑如下离散线性系统：

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (3-1)$$

其中  $x(k) \in \mathbb{R}^n$ ,  $u(k) \in \mathbb{R}^m$ ,  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 。控制器采用状态反馈控制律，令输入  $u(k) = Kx(k)$ ，其中  $K$  是反馈增益矩阵。若传感器到控制器的反馈信号和控制器到执行器的控制信号能够实时送达的情况下，该系统能够保持正常工作。然而当我们将其改造成由多跳网络通信的无线网络化控制系统，如图 3-1，原有的控制方法无法继续保证系统稳定。

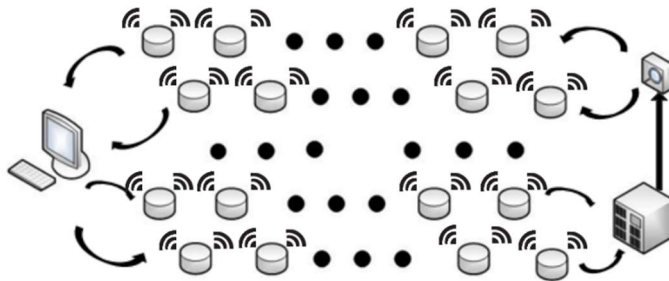


图3-1 无线多跳网络控制系统示意图

Figure 3-1. Diagram for wireless multi-hop networked control systems

无线多跳网络是一种由多个通信节点组成的通信网络，每个节点具备通信和计算能力，在该网络中，信息的传输并不是点对点的相互通信，信息接收者收到来自发送者的信息往往可能经过了多个中间节点的转发，因此称之为多跳网络。无线 mesh 网络，ad hoc 网络和无线传感器网络均可归类于无线多跳网络。本章中所考虑的多跳网络由多个具有一定通信和计算能力的通信节点组成，这些通信节点具有低成本、易组网、易维护等特点，这为多跳网络带来了更大的灵活性等许多优势，然而这些节点也因为没有缆线相连只能通过电池供电，因此存在能量限制等问题。同时，多跳网络也存在着无线通信中不可避免的通信延迟问题。

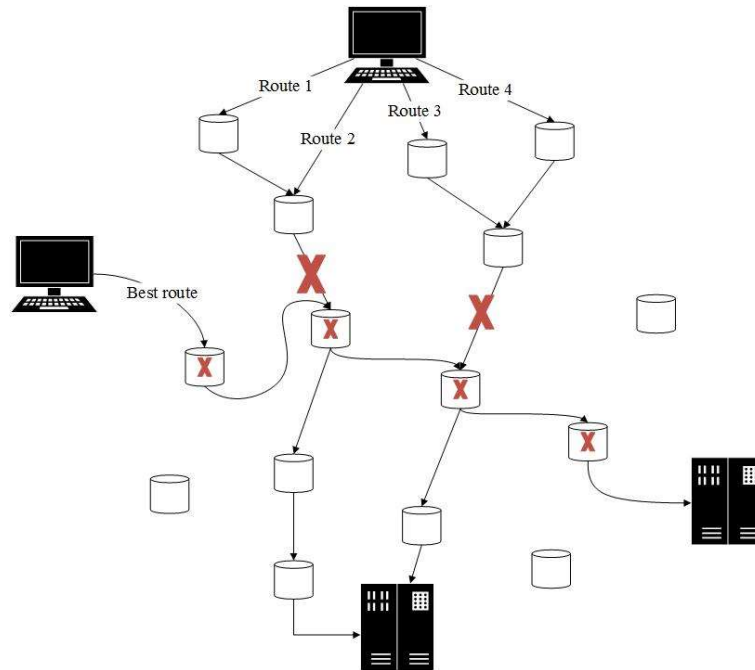


图3-2 多跳网络分块导致的通信路径截断

Figure 3-2. Truncation of communication path caused by blocking in multi-hop network

降低通信时延与合理利用网络能量是我们希望做到的，但两者存在着一定的矛盾。公共多跳网络中，使用者通常存在多条由不同节点组成的通信路径可选择，为了自身的需求，使用者往往会长期占用通信时延最小的路径。然而，若单个使用者长时间使用同一条通信路径，势必会使得该路径上的节点能量被快速消耗，极端情况下，这些节点能量完全耗尽，导致网络出现分块，如图 3-2，其他使用者将无法通信。

因此，我们在设计无线多跳网络控制系统时，需要同时满足网络化系统的低时延与多跳网络的能量合理分配要求。本章将在之后小节的设计中，引入与节点能量和时延相关的考量，并设计有效的控制器对通信时延做出应对。

## 3.2 能量与时延感知路由与控制器设计

### 3.2.1 能量与时延感知路由设计

多跳网络中的通信节点工作依赖于保存在自身缓存的路由表，路由表中包含周边节点 ID、能量信息、工作状态、与相邻节点的距离、传输时延等，并定时进行更新，通过这些信息指导节点选择下一跳节点将信息传递出去。

为避免上节所述的网络分块情况，可采用能量多径路由解决。该路由方法基于节点的通信能耗和自身的剩余能量信息，能够均衡使用所有节点的能量，延迟网络的生存寿命。此时，各节点不再固定选择下一跳的节点，而是根据概率选择下一跳的节点，概率  $P^e$  计算方式如下：

$$P_{N_j, N_i}^e = \frac{1/C_{N_j, N_i}}{\sum_{k \in FT_j} 1/C_{N_j, N_k}} \quad (3-2)$$

其中  $P_{N_j, N_i}^e$  代表基于能量考虑的节点  $N_j$  发往下一跳的选择概率，而  $C_{N_j, N_i}$  表示  $N_j$  节点经由  $N_i$  节点到达目的节点的代价， $FT_j$  是节点  $j$  路由表中可用的下一跳节点集合。

$$C_{N_j, N_i} = Cost_e(N_i) + Metric_e(N_j, N_i) \quad (3-3)$$

其中  $Cost_e(N_i)$  是节点  $N_i$  到目的节点的通信代价， $Metric_e(N_j, N_i)$  表示  $N_j$  与  $N_i$  之间的直接通信代价。

$$Metric_e(N_j, N_i) = e_{ij}^\alpha R_i^\beta \quad (3-4)$$

其中  $e_{ij}^\alpha$  表示  $N_j$  到  $N_i$  的直接通信的能量消耗， $R_i^\beta$  是节点  $N_i$  的剩余能量， $\alpha, \beta$  为固定常数。

$$Cost_e(N_j) = \sum_{k \in FT_j} P_{N_j, N_i}^e C_{N_j, N_k} \quad (3-5)$$

另一方面，本节对该路由进行改进，尽可能满足控制系统对低通信时延的要求。仿照上述协议中的概率计算方式，引入通信时延作为考虑因素，得到概率计算公式：

$$P_{N_j, N_i}^\tau = \frac{1/\Gamma_{N_j, N_i}}{\sum_{k \in FT_j} 1/\Gamma_{N_j, N_k}} \quad (3-6)$$

其中  $P_{N_j, N_i}^\tau$  表示基于时延的下一跳选择概率， $FT_j$  是可用的下一跳节点集合。

$$\Gamma_{N_j, N_i} = Cost_\tau(N_i) + Metric_\tau(N_j, N_i) \quad (3-7)$$

其中  $\Gamma_{N_j, N_i}$  表示  $N_j$  节点经由  $N_i$  节点到达目的节点的时延， $Cost_\tau(N_i)$  是节点  $N_i$  到目的节点的期望时延， $Metric_\tau(N_j, N_i)$  表示  $N_j$  与  $N_i$  之间的传输时延，由于节点间的距离较短且干扰较小，所以节点两两间的时延可以近似看做常数时延。

$$Cost_{\tau}(N_i) = \sum_{k \in FT_j} P_{N_j, N_i}^{\tau} \Gamma_{N_j, N_k} \quad (3-8)$$

于是，我们可以综合之前基于能量的选择概率，将选择概率改写为：

$$P_{N_j, N_i} = \lambda P_{N_j, N_i}^e + (1 - \lambda) P_{N_j, N_i}^{\tau} \quad (3-9)$$

其中权重系数  $\lambda \in (0, 1)$ ，可以根据实际偏重进行设置。

### 3.2.2 基于包的预测控制器设计

基于无线通信的网络化控制系统通常无法避免通信时延所带来的影响，在本章的设计中，多跳网络控制系统能够合理使用节点能量并一定程度上兼顾通信中的传输时延，但仍无法忽视其对控制系统的影响。因此，在本节中设计了基于包的预测控制器来应对该问题。

我们首先对整个网络化系统做以下合理假设：

- 1) 系统和网络的时钟同步，采样周期不变；
- 2) 计算时延远小于通信时延，在考虑整体时延时只考虑通信时延；
- 3) 控制器与执行器均使用时间戳最新的信息；
- 4) 多跳网络规模有限，可以假设时延存在上界。

如图所示，控制系统的无线通信存在双通道时延，即反馈时延  $\tau_{sc}$  与前向时延  $\tau_{ca}$ ，控制器  $k'$  时刻能够收到的感测状态数据  $x(k' - \tau_{sc, k'})$ ，基于该状态数据和标称模型，可获得如下预测控制量：

$$u(k' + 1 | k' - \tau_{sc, k'}) = Kx(k' - \tau_{sc, k'}) \quad (3-10)$$

此后，控制器可通过状态数据和以上公式递推得到控制量序列  $U(k' | k' - \tau_{sc}) = [u(k' + 1 | k' - \tau_{sc, k}), u(k' + 1 | k' - \tau_{sc, k'}), \dots, u(k' + \bar{\tau}_{ca} | k' - \tau_{sc, k'})]^T$ 。其中  $\bar{\tau}_{ca}$  为前向通道时延上界。之后，将控制量序列打包发送给执行器，而执行器将根据时间戳自行判断使用相应的控制量。

在采用前一节中的能量与时延感知路由的多跳网络中，每次信息的传输时延均未知，但我们仍可以根据通信路径的最大跳数来界定时延的上界，因此在本节中我们根据预测和补偿的思想设计了控制器，令打包发送的控制量序列能够覆盖时延上限，在执行器无法收到实时控制量的情况下进行补偿。

### 3.3 稳定性分析

令  $X(k) = [x(k) \ x(k-1) \ \dots \ x(k-\bar{\tau})]$ ，其中  $\bar{\tau} = \bar{\tau}_{sc} + \bar{\tau}_{ca}$  代表往返时延上界。我们可以将原闭环系统改写成如下形式：

$$X(k+1) = \Xi X(k) \quad (3-11)$$



其中

$$\Xi = \begin{pmatrix} A & \cdots & K & \cdots & \cdots \\ I & & & & 0 \\ & I & & & 0 \\ & & \ddots & & \vdots \\ & & & I & 0 \end{pmatrix} \quad (3-12)$$

其中  $I$  是  $n$  阶单位矩阵。

**定理 3.1** 闭环系统(3-11)稳定的充分条件是以下  $(\bar{\tau}_{sc} + 1) \times (\bar{\tau}_{ca} + 1)$  的 LMIs:

$$\Xi^T P \Xi < P \quad (3-13)$$

存在正定解  $P = P^T > 0$ 。

**证明** 令李雅普诺夫函数为  $V(k) = X^T(k)PX(k)$ ，我们可以获得系统的增量形式:

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &= V(k+1) - V(k) \\ &= X^T(k)(\Xi^T P \Xi - P)X(k) < 0 \end{aligned} \quad (3-14)$$

该证明方法可以参考文献[38]，证明完毕。

这意味着只要能够事先获得通信时延上界，便能够使用本节设计的基于包的预测控制器令闭环系统保持稳定。

### 3.4 数值仿真

在本节中使用数值仿真展示本文设计的有效性。

假设(3-1)所示的线性系统参数如下

$$A = \begin{pmatrix} 0.98 & 0.1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0.04 \\ 0.1 \end{pmatrix} \quad (3-15)$$

初值  $x_0 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0.2 \end{pmatrix}$ ，当第一个状态信息到达控制器之前没有控制量产生，在第一串打包的控制量序列到达执行器之前被控对象输入为零。假设已知传感器到控制器的时延上限  $\bar{\tau}_{sc}$  和控制器到执行器的时延上限  $\bar{\tau}_{ca}$  分别为 5 步和 7 步，闭环总时延为 12。这是一个开环不稳定系统。

我们希望这个不稳定系统能够在基于包的预测控制器下保持稳定，并且效果比传统的控制方法效果更佳。我们需要保证执行器总是能够正常工作，因此控制器计算出增广矩阵  $K$ ，通过其计算出 12 步之内的控制量，并将其打包发送给执行器。

$$K = \begin{pmatrix} -0.5372 & -1.1084 \\ -0.4471 & -1.0182 \\ -0.3687 & -0.9380 \\ -0.3006 & -0.8656 \\ -0.2414 & -0.7993 \\ -0.1901 & -0.7382 \\ -0.1458 & -0.6816 \\ -0.1075 & -0.6289 \\ -0.0747 & -0.5799 \\ -0.0466 & -0.5341 \\ -0.0227 & -0.4914 \\ -0.0024 & -0.4516 \end{pmatrix} \quad (3-16)$$

当执行器收到打包发送的控制量序列之后，便可以根据控制量上的时间戳挑选对应当前时刻的控制量使用，避免了使用过时信息可能会导致的系统性能下降等一系列问题。

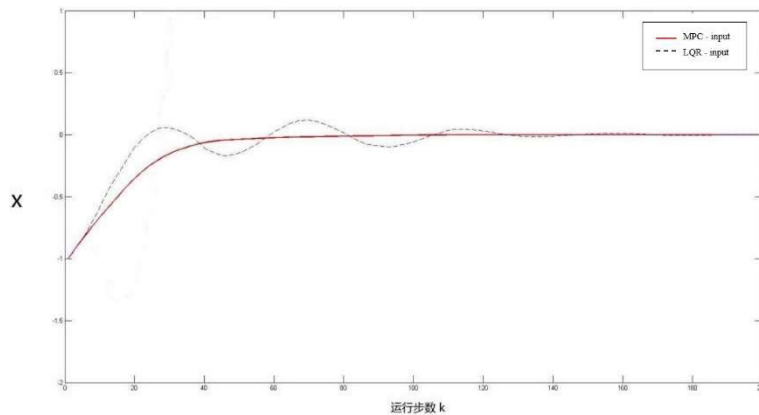


图3-3 两种控制方法下的系统状态轨迹

Figure 3-3. System state trajectory under two control methods

由于在数值仿真中没有加入扰动量，故两种控制方式均能达到较好的控制效果。但通过仔细观察可以发现，本章中所设计的控制方法比 LQR 控制更早趋于稳定，并且几乎没有超调量，如图 3-3 所示。且如图 3-4 所示，在控制量波动上，基于包的预测控制也表现得更好。

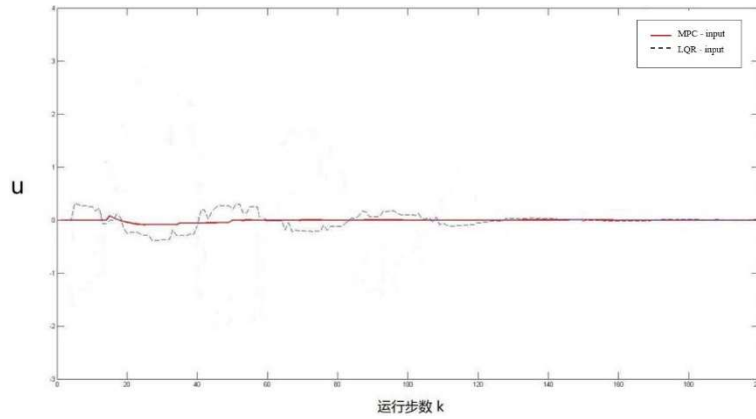


图3-4 两种控制方法下的输入变化轨迹

Figure 3-4. Input change trajectory under two control methods

### 3.5 本章小结

本章内容初步将多跳网络的独有特性体现在网络化控制系统中，针对网络节点能量有限问题和控制系统低时延需求改进了传统路由规则，让网络中的可用节点和路径能更好地利用起来的同时，尽可能选择较低时延的路径，从而使能量分布更为均衡，并提升控制性能。由于无线多跳网络的时延具有较大随机性，在控制器的设计方面，使用了基于包的预测控制方法，该控制方法十分适合使用在系统时延无法确定的情况，可以保证系统稳定并达到较好的性能。最后的数值仿真表明了本文的设计和控制方法的有效性。

## 第四章 无线多跳网络控制系统中调度策略与控制器协同设计

在上一章中初步考虑了多跳网络控制系统中节点能量限制和通信时延问题，做了针对性的协同设计，在本章中对多跳网络控制系统进行更深入的研究。

针对共享多跳网络的多个网络化控制系统中存在的节点能量有限、通信路径冲突、时延分析困难等问题，建立了多跳网络的数学模型描述节点的工作与通信链路，简化了时延的计算；为了解决上述问题，本章提出了协同设计方法，以网络中节点的工作顺序作为调度对象，提出了两种网络调度策略，两种策略的各有侧重，但均能够合理利用网络资源并满足系统性能要求；为了应对调度无法消除的通信时延，设计了基于预测控制思想的控制器令闭环系统保持稳定，并通过数学分析证明了这一点。最后，通过仿真验证了两种方法的有效性，并比较了两种方法的优劣。

### 4.1 无线多跳网络控制系统建模和问题描述

无线多跳网络控制系统中，如图 4-1，控制器与被控对象通过无线多跳网络相互通信，使控制器能够对被控系统进行远程操控。

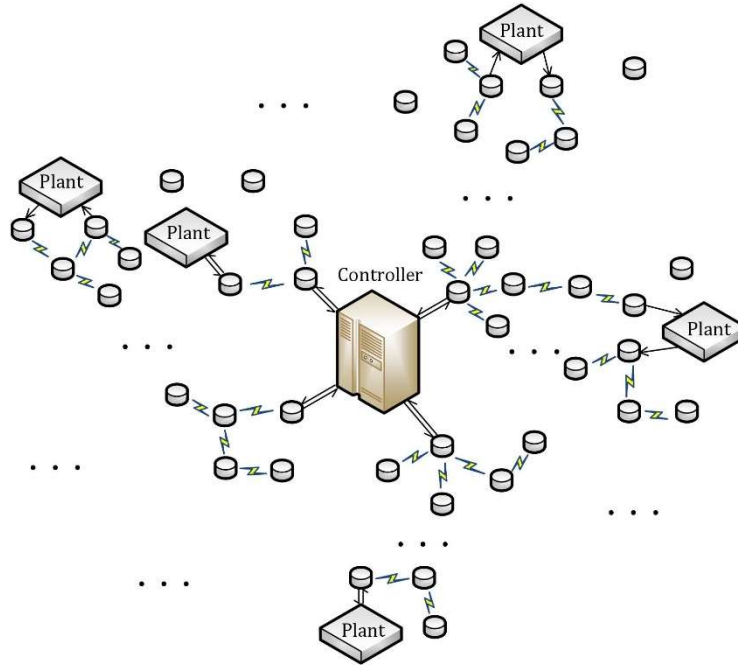


图4-1 无线多跳网络控制系统

Figure 4-1. Wireless multi-hop networked control systems

这其中网络部分存在节点间通信冲突，节点能量有限等问题；动态系统部分则需要

考虑被控对象扰动问题和通信时延。为了解决以上问题,本文采取网络调度和预测控制联合设计解决以上问题,本节中,首先对无线多跳网络控制系统进行分析<sup>[69]</sup>。

#### 4.1.1 动态系统建模

在本文中考虑多个子系统的集合  $S = \{(A_i, B_i, \omega_i) : i \in I\}$ ,  $S_i$  代表编号为  $i$  的离散系统。其中  $I = \{1, 2, \dots, M\}$ ,  $M$  代表系统数量。假设  $\omega_i$  为有界误差。系统方程:

$$x_i(k+1) = f_i(x_i(k), u_i(k), \omega_i(k)) \quad (4-1)$$

其中  $x_i \in \mathbb{R}^n$ ,  $u_i \in \mathbb{U}_i \subset \mathbb{R}^m$ ,  $\omega_i \in \mathbb{W}_i \subset \mathbb{R}^n$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ 。

设备的传感器发送信息给控制器,控制器传输控制量给执行器,两次传输均通过一个无线多跳网络进行。信息在无线多跳网络中传递,节点之间信号范围的重叠将产生通信冲突,进而可能出现数据包丢失和通信延迟问题,为了解决这些问题,对网络中的节点进行调度规划是一种较好的解决办法,避免冲突发生将解决丢包问题,而不可避免的时延问题可以通过设计合理的控制器来进行补偿。

#### 4.1.2 无线多跳网络建模

为了分析网络的结构并对网络进行调度安排,首先需要对网络进行建模。无线多跳网络硬件上由多个可通信的无线节点组成。当节点位置固定后,各个节点可与其通信范围内的其他节点进行无线通信,以此形成一个无线网状网络。节点还可以与其他外接设备连接,这些设备可以通过所连接的节点进行数据的传输,因此无线多跳网络可以成为网络化控制系统所使用的通信网络。

我们考虑使用无向图  $G$  来表示无线多跳网络:  $G = (V, E)$ 。其中  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$  为  $N$  个节点的顶点集,顶点对应为无线多跳网络中的通信节点,所有的通信节点型号功能均相同,每个节点的通信半径是  $r_0$ 。 $E = \{e_{i,j} = (v_i, v_j) : r_{i,j} \leq r_0, i \neq j\} \subseteq V^2$ , 是所有能够相互通信的节点之间的边集合。

节点间有边相连即代表互相存在于通信范围内,容易想到若通信范围内有个节点存在,同时工作时将有可能产生通信冲突问题。通常的解决办法有 CSMA/CA 等冲突避免机制,然而,在冲突频繁情况下这些机制可能会导致传输的时延大幅增加,若节点的工作时间可以根据当前需要进行统一调度分配,可做到更加合理和高效。

另考虑到节点工作需要消耗能源,假设单个节点储能上限  $\sigma_f$ , 用  $\sigma_i = \mathcal{C}(v_i), \sigma \in [0, \sigma_f]$  来表示节点  $i$  当前能量。其中映射  $\mathcal{C} : V \rightarrow \mathbb{R}^+$ 。

无线通信节点收发信号和侦听均需要消耗能源,通常为了增加节点的使用寿命,使用者都会尽可能增加节点休眠时间以节能。然而,休眠时间增长意味着工作时间的减少,可能导致发送节点的信息积压并且同样会造成信息传输时延的大幅

增加。本文同样考虑采用调度的办法解决该问题，节点可根据调度所安排的工作表进行工作，其余时间可以进行休眠节省能量。

#### 4.1.3 问题描述

我们在本文中考虑一个共享的无线多跳网络，多个控制器和多个被控对象组成多个网络化控制系统。网络化控制系统中除了需要考虑被控对象的性能之外，网络状况也同样需要重视。无线多跳网络的工作节点由电池供电，节点无法工作可能导致网络分块甚至部分瘫痪等严重问题。而节能问题的理想解决办法是减少信息发送次数和安排合理的工作策略，这同样可以通过设计调度策略实现。于是调度策略至少需要同时解决节点通信冲突、尽可能减少通信时延和节省能源等问题。相关工业标准 WirelessHART 和 ISA100 等允许对网络架构等方面做出一定程度上的调整，可以在此之上进行设计，调度和控制器设计将会在下一节展示。

### 4.2 网络调度与预测控制协同设计

如上节提到的，网络面临的节点通信冲突和节点能量  $\sigma$  利用两个问题，而闭环控制系统也希望信息传输时延  $\tau$  能够尽可能小。若单独考虑通信冲突和节能问题，我们可以通过安排合理的节点工作顺序并减少各节点总工作时间，然而这将会增大信息的传输的时延；反之，单独考虑减少信息时延可以简单地增加节点收发信息的频率，而这会导致节点能源快速消耗。在本节中将考虑结合二者的需求，采取网络调度与闭环系统的控制器协同设计。

因为网络节点布置完成之后，网络的拓扑结构不再变化，此时可以通过调节各节点工作顺序、工作时间等，实现网络调度和刷新等功能。设计调度策略  $\Psi$  解决上述问题之前，首先对网络可以调配的资源 and 参数进行定义和声明如下：

1) 设计调度策略时，我们将时间划分成一个个时隙。  $T_c$  为固定时隙 TS(Time Slot)长度，同时也是离散动态系统的工作步长。无线网络中不可避免存在信号竞争，当有多个节点通信范围重叠时，采用竞争访问机制可能造成比较严重的数据包延迟和丢失问题。将时间切分等长的时隙并调度的做法可以较好地避免这种情况。

2)  $T_v$  为调度刷新间隔 SUI(Scheduling Update Interval)。由于节点能量的变化和接入网络的服务增减，调度策略并不适合一成不变。网络将定期获取网络中最新的信息，并以此重新计算调度，以保证较好的性能。该刷新间隔大于一个最小长度。

3)  $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots\} \subset 2^E$  为网络节点间的通信调度。调度策略用来规定节点的工作规则，在某一时隙中，只有被允许的节点才开始工作，其余节点停止工作以避免通信冲突并节省能量。如第  $h$  个时隙中允许通信的连接表示为  $\psi(h) \subseteq E$ 。调度确定以后，网络将周期性使用该调度规则，直到下一次调度刷新。

4)  $\mathcal{R}: S \rightarrow 2^E$ , 映射  $\mathcal{R}$  用来得到每个子系统的通信路径。实际中, 若网络的拓扑和设备的位置不变, 所有的路径便已经固定, 可以用无线传感器网络技术中的路径发现算法实现。同一条路径既可以当前向通道也可以做反馈通道, 只需颠倒顺序即可。因此系统  $S_i$  将会有  $\text{card}^2(\mathcal{R}(S_i))$  种闭环路径可能性。举例: 由于信息传递是按顺序在路径上传递, 所以规定该映射得到的集合中的元素按序排列。如第 2 个系统的第 3 条前向路径的第 4 组节点组可表示为  $\mathcal{R}_{3,[4]}(S_2)$ 。

5) 设计调度算法需要考虑到网络通信的公平性和节点的剩余能量。公平性体现在所有  $\forall e \in E$  在每次调度中至少出现一次。假设  $\Delta: V \rightarrow \mathbb{N}, \Delta(v_i)$  为节点  $v_i$  在一次调度周期中的工作次数; 而  $\Delta: E \rightarrow \mathbb{N}, \Delta(e_{i,j})$  代表链接  $e_{i,j}$  在一次调度中的工作次数。要求  $\Delta(e_{i,j}) \geq 1, \forall e_{i,j} \in E$ 。此外, 调度策略颗粒合理利用节点能量。调度规定了节点的工作时段和工作次数, 不工作时休眠, 最大限度地节省能量并避免了节点间通信干扰。

#### 4.2.1 基于随机的调度策略

考虑到上述要求, 设计一种随机调度策略  $\Psi = \text{Alg}_1(\mathcal{O})$ 。该方案只考虑  $\Delta(e_i, j)$  与  $\sigma_i$  两方面, 在节点工作顺序和次数采用随机方式生成。具体方式分成两步进行: 第一部分: 在确保没有通信冲突的情况下, 随机摆放  $e_{i,j}$ , 使得  $\Delta(e_{i,j}) = 1, \forall e_{i,j} \in E$ 。先为第一个时隙集合任选一对节点作为第一个元素; 接着任选该链接对通信范围之外的链接作为第二个元素; 以此类推直到不存在通信范围之外的链接, 进入下一个时隙; 执行相同操作, 直到所有集合  $E$  中的元素全部被使用一次。第二部分: 将剩余能量仍充裕的节点对保证通信不冲突情况下随机填充入各个时隙。

通过以上两步完成随机调度, 第一步中的操作能够保证各个节点之间通信没有冲突, 并且保证整个网络中的每个节点均有通信机会; 第二步中的操作则提升了整个网络的通信效率。

#### 4.2.2 基于系统误差界及优先级的调度策略

随机生成的网络调度策略没有考虑网络化控制系统的存在, 在本小节, 设计了一种考虑系统优先级的调度方案  $\Psi = \text{Alg}_2(\mathcal{O})$ 。此方案同样满足了  $\Delta(e_i, j)$  与  $\sigma_i$  的要求, 除此之外, 还把系统误差界纳入考虑, 以保证被控系统的性能。优化函数如下:

$$\begin{aligned} & \min \mathcal{L}(\Gamma, d) \\ & s.t. \\ & \Gamma_s = g_\tau(\mathcal{R}(s), \mathcal{R}'(s), \Psi) \\ & \Delta(e_{i,j}) \geq 1 \\ & \forall s \in I, \forall e_{i,j} \in E \end{aligned} \quad (4-2)$$

其中，目标函数  $\mathcal{L}(\Gamma, d) = \sum_{s=1}^M (\lambda_{1,s} \beta_{1,s} d_s + \lambda_{2,s} \max(0, \Gamma_s - \Gamma_m)) + \mu \sum_{h=1}^{card(\Psi)} card(\psi(h))$ 。而

系数  $\beta_{1,s} = L_{V_s} L_{f_s}^{\Gamma_s - \tau_{a,s}} \frac{1 - L_{f_s}^{\Gamma_s}}{1 - L_{f_s}} L_{\omega_s}$  将在后面证明中提到， $d_s \geq \|\omega_s\|$  是系统  $S_s$  的误差界，

$\lambda_{1,s}, \lambda_{2,s}$  分别是自定义的每个系统优先级权重系数和时延权重系数， $\Gamma_s$  是系统  $S_s$  的总时延，时延的计算将在下一节中展示， $\max(0, \Gamma_s - \Gamma_m)$  是惩罚函数，尽量保证每个系统的时延不超过一个上界  $\Gamma_m$ ，

$\sum_{h=1}^{card(\Psi)} card(\psi(h))$  代表该调度中链接出现数量，

$\mu$  是能量权重系数。

求解该优化问题，可以得到一组调度序列  $\Psi^*$ ，该序列满足网络中各节点通信机会的公平性，并使得整体代价  $\mathcal{L}(\Gamma, d)$  最小。此情况下，可以按照事先设定的各被控对象优先级分配相应的通信时延。

注：结合实际情况可推断该优化问题必然有一个最优解  $\Psi^* = \arg \min \mathcal{L}$ 。但由于调度的生成方式并没有一个显式的公式，导致无法使用传统的优化方法优化。网络规模较小时，可以采用枚举法，而当网络规模较大时，计算时间但是这在网络化控制系统中是无法接受的。一种折中的办法是采用贪心算法，从加权系数最大系统的最短路径开始安排调度，直至安排完所有系统。最后将没有用的连边在保证无通信冲突的情况下随机填充，完成调度策略。在调度刷新周期之间，若有新系统加入，不改变当前调度，挑选在此调度策略下时延最短路径通信，直至下一次调度刷新时，将其纳入考虑。

一个公共网络允许有旧服务停止和新服务的接入。以上两种调度保证了新服务从任意节点加入网络的可能性。当新服务加入时，会把自己申请的优先级给总控制器，但是网络并不立即改变调度以保证原有服务的不会被影响，新服务可以暂时在当前调度下进行工作。直到下一次调度刷新时，主控制器再重新计算新的调度策略。

### 4.3 控制器与执行器设计

采用上一部分的网络调度设计，能够按不同需要合理地分配网络资源。然而，网络通信时延仍然是不可避免的，控制器设计需要考虑到网络时延的存在并保证被控对象仍能够正常工作，所以在控制器设计之前需要对时延进行较为精确的计算。而当我们无线多跳网络中的总时延看作每一跳所用时延之和，便可以计算出一个较为精确的总时延。



### 4.3.1 时延计算

一条路径的时延与调度策略有关。调度策略控制着可工作的节点组。如图 4-2,  $v_a$  要发送信息给  $v_c$ , 若要计算传输时延, 首先在找到在哪个时隙中,  $v_b$  收到来自  $v_a$  的信息。为了避免通信冲突,  $e_{a,b}$  与  $e_{b,c}$  不会同时工作。于是, 该信息需要等到下一个  $e_{b,c}$  出现才能继续传递下去。又因为将时间切分成时隙后, 时延便可看成从开始到结束的消息传递时所经历的时隙个数乘以时隙长度, 又因为时隙长度等于离散系统步长, 所以在分析过程中只需要计算时隙个数。

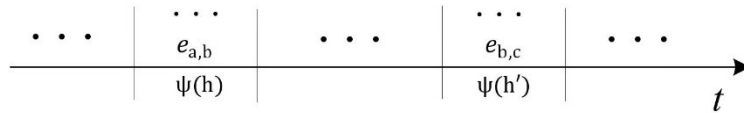


图4-2 时延构成示意图

Figure 4-2. Delay composition

无线多跳网络控制系统的时延同样与信号往返路径和调度有关,  $\Gamma_i = \tau_{sc,i} + \tau_{c,i} + \tau_{ca,i} + \tau_{a,i} = g_\tau(\mathcal{R}(S_i), \Psi)$ 。一条完整的时延路径如图 4-3 所示。与一般的双向时延系统的区别在于增加了  $\tau_{c,i}, \tau_{a,i}$  两项, 忽略控制器的计算时延,  $\tau_{c,i}$  是控制器的等待时延, 这是因为控制器收到信号并计算完毕后还需要等待发送节点工作开始, 同理, 设备端也存在等待时延  $\tau_{a,i}$ 。

前向路径时延  $\tau_{ca}$  与反馈路径时延  $\tau_{sc}$  分别可以看作是各自起始节点对到各自终点节点对之间所需要经历的时隙数量之和。

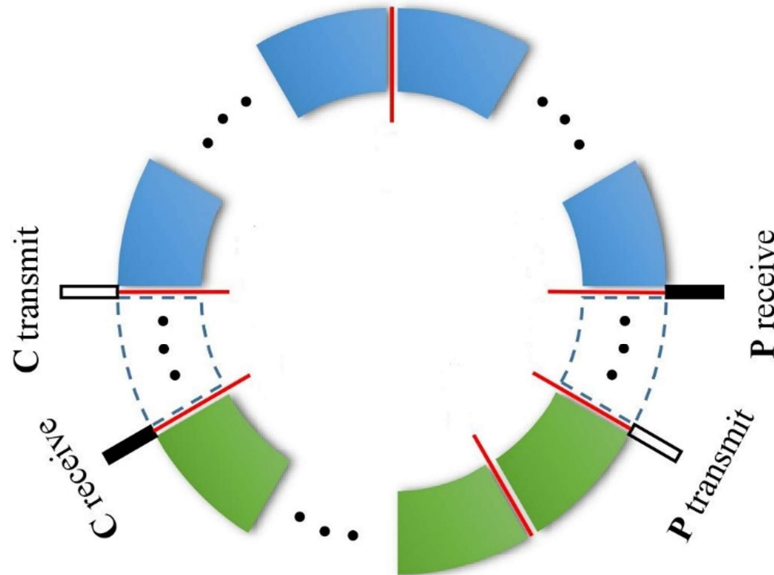


图4-3 通信时延周期

Figure 4-3. Communication delay period

等待时延  $\tau_a$  则是前向路径的终点对于反馈路径的起始节点对之间间隔的时隙数量,  $\tau_c$  同理。闭环系统总的往返时延  $\Gamma = \tau_{sc} + \tau_c + \tau_{ca} + \tau_a$ 。

#### 4.3.2 基于预测控制的控制器设计

本文采用预测控制的思想设计闭环网络化系统的控制器。由于网络时延的存在, 被控对象无法实时从控制器处获得控制量, 本文拟采用基于包的预测控制思想。将预测控制器计算得到的一连串控制量打包一并发给被控对象, 以填补控制量的缺失。

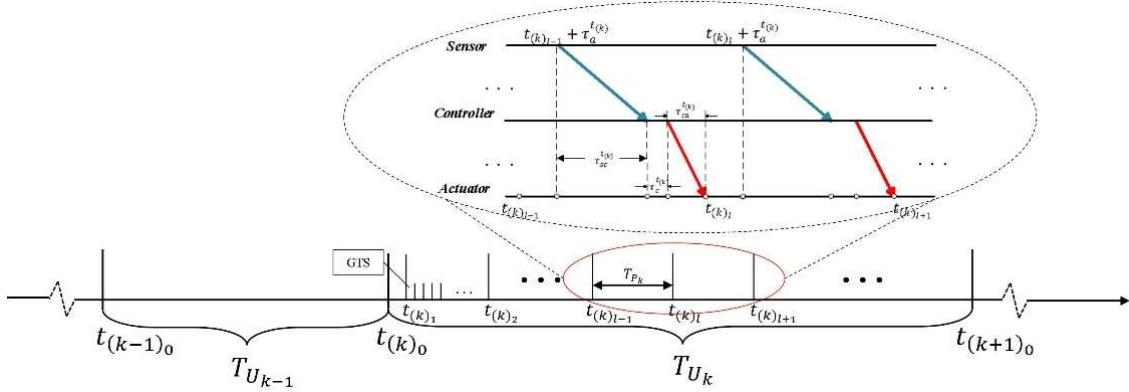


图4-4 时序图

Figure 4-4. Timing diagram

由上一节可知, 一个闭环系统的信息往返时延  $\Gamma = t_{l+1} - t_l$ , 如时序图 4-4 所示, 因此, 设置预测时域长度  $T_p = \Gamma$ 。

求解以下优化问题:

$$\min J(x(t_l), \hat{U}(t_l))$$

s.t.

$$\hat{x}(k+1 | \tilde{x}(t_l)) = f(\hat{x}(k | \tilde{x}(t_l)), \hat{u}(k | \tilde{x}(t_l)), 0) \quad (4-3)$$

$$\hat{x}(t_l | \tilde{x}(t_l)) = \tilde{x}(t_l)$$

$$\tilde{x}(t_l) = f^{T_p - \tau_a}(x(t_{l-1} + \tau_a), \{u\}_{t_{l-1} + \tau_a}^{t_l - 1}, 0)$$

$$\forall u \in \mathbb{U}, k = t_l, t_l + 1, \dots, t_{l+1} - 1$$

其中  $J(x(t_l), \hat{U}(t_l)) = \sum_{k=t_l}^{t_{l+1}-1} l(\hat{x}(k | \tilde{x}(t_l)), \hat{u}(k | \tilde{x}(t_l))) + V(\hat{x}(t_{l+1} | \tilde{x}(t_l)))$ 。  $l(\cdot)$  和  $V(\cdot)$  分别是阶段代价和终端代价函数。由于本文中假设所有系统都是同一类型的系统, 故在式中为了简洁, 省略了系统序号下标。

由图中可以看出, 因双向时延的存在,  $t_l - \tau_{sc} - \tau_c$  时刻的控制器只能得到  $t_{l-1} + \tau_a$  时刻的系统状态, 而执行器所需的控制量则是  $[t_l, t_{l+1} - 1]$  区间的控制序列。一种解决办法是将上一次算得的预测控制量保存在控制器的缓存器内, 控制器以

$x(t_{l-1} + \tau_a)$  和  $U(t_{l-1} + \tau_a)$  估计  $\tilde{x}(t_l)$  并以此作为基准状态，继续计算未来的状态和控制量。

求解以上优化问题可以得到最优解  $U^*(t_l) = [u^{*T}(t_l | \tilde{x}(t_l), u^{*T}(t_l + 1 | \tilde{x}(t_l)), \dots, u^{*T}(t_{l+1} - 1 | \tilde{x}(t_l))]^T$  对应状态量  $X^*(t_l) = [x^{*T}(t_l | \tilde{x}(t_l), x^{*T}(t_l + 1 | \tilde{x}(t_l)), \dots, x^{*T}(t_{l+1} - 1 | \tilde{x}(t_l))]^T$ 。将此时最优的代价写作  $J^*(x(t_l)) = J^*(x(t_l), U^*(t_l))$ 。

#### 4.3.3 智能执行器设置

设置执行器将智能挑选当前时刻对应的控制量进行内工作。当一个网络调度生成后，每个系统的往返时延  $\Gamma$  便确定。在两个调度刷新周期之间，执行器每次将新收到的控制包保存在缓存器中，智能挑选当前时刻控制量即可。

### 4.4 闭环多跳网络化控制系统稳定性分析

基于以上网络调度与预测控制的协同设计，闭环网络化控制系统可能存在执行器有对应时刻控制量和调度策略改变时，短时间内没有对应控制量的两种情况，系统方程可改写为：

$$x(k+1) = \begin{cases} f(x(k), u^*(k), \omega(k)) & , \text{if } u^*(k) \text{ exists} \\ 0 & , \text{others} \end{cases} \quad (4-4)$$

针对以上的闭环系统方程，需要以下假设来分析系统的稳定性。

**假设 4.1** 假设存在正常量  $L_f, L_\omega$  令系统状态：

$$\|f(x, u, v) - f(x', u, v')\|^s \leq L_f \|x - x'\|^s + L_\omega \|\omega - \omega'\|^s \quad (4-5)$$

其中  $\mathbb{W}$  满足  $\|\omega\| \leq d, \forall \omega \in \mathbb{W}$ 。

**引理 4.1** 若假设 4.1 成立，容易得到

$$\|x(i) - x'(i | \tilde{x}(j | k))\|^s \leq \frac{1 - L_f^{i-k}}{1 - L_f} L_\omega d^s \quad (4-6)$$

**假设 4.2** 存在一个可行的控制律  $\kappa$ ，使得  $\bar{u} = \kappa(x)$ ，且

$$V(f(x, \bar{u}, 0)) - V(x) \leq -l(x, \bar{u}), \forall x \in \mathbb{R}^n. \quad (4-7)$$

其中用可行控制量预测得到的可行状态量表示为  $\bar{x}$ 。

**引理 4.2** 若假设 4.2 成立，容易得到

$$l(x(k), u^*(k | k)) \leq J^*(x(k)) \leq V(x(k)), \forall x(k) \in \mathbb{R}^n \quad (4-8)$$

其证明可参考文献[70]中的相关内容。

假设 4.3 存在正常量  $L_l, L_v, \alpha_l, \alpha_v$ , 令

$$\begin{aligned} |l(x, u) - l(x', u)| &\leq L_l \|x - x'\|^s, \\ |V(x) - V(x')| &\leq L_v \|x - x'\|^s, \\ l(x, u) &\geq \alpha_l \|x\|^s, \\ V(x) &\geq \alpha_v \|x\|^s, \\ \forall x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{U} \end{aligned} \quad (4-9)$$

其中  $l(0, 0) = 0, V(0) = 0$ 。

引理 4.3 若假设 4.1、4.2、4.3 成立, 且令  $\eta = \inf_{x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{U}} \frac{l(x, u)}{V(x)}$ 。有

$$J^*(x(t_{(k)_l})) \leq (1 - \eta)J^*(x(t_{(k)_{l-1}})) + \beta d \quad (4-10)$$

其中  $\beta_{t_k} = L_v L_\omega L_f^{\tau_{sa}^{t(k)}} \frac{1 - L_f^{t(k)}}{1 - L_f}, l = 1, 2, \dots$ 。

证明

$$\begin{aligned} &J^*(x(t_{(k)_l})) - J^*(x(t_{(k)_{l-1}})) \\ &\leq J(x(t_{(k)_l}), \bar{U}(t_{(k)_l})) - J^*(x(t_{(k)_{l-1}})) \\ &= \sum_{j=t_{(k)_l}}^{t_{(k)_{l+1}}-1} l(x(j | \tilde{x}(t_{(k)_l})), \kappa x(j | \tilde{x}(t_{(k)_l}))) \\ &\quad + V(x(t_{(k)_{l+1}} | \tilde{x}(t_{(k)_l}))) - V(x^*(t_{(k)_l} | \tilde{x}(t_{(k)_{l-1}}))) \\ &\quad - \sum_{j=t_{(k)_{l-1}}}^{t_{(k)_l}-1} l(x^*(j | \tilde{x}(t_{(k)_{l-1}})), u^*(j | \tilde{x}(t_{(k)_{l-1}}))) \end{aligned} \quad (4-11)$$

其中,  $\tilde{x}(t_{(k)_l}) = \tilde{x}(t_{(k)_l} | t_{(k)_l} - \tau_{sa}^{t(k)})$ 。

由假设 4.2 递推可得

$$V(x(t_{(k)_{l+1}} | \tilde{x}(t_{(k)_l}))) \leq V(x(t_{(k)_l} | \tilde{x}(t_{(k)_l}))) - \sum_{j=t_{(k)_l}}^{t_{(k)_{l+1}}-1} l(x(j | \tilde{x}(t_{(k)_l})), \kappa x(j | \tilde{x}(t_{(k)_l}))) \quad (4-12)$$

其中  $V(x(t_{(k)_l} | \tilde{x}(t_{(k)_l}))) = V(\tilde{x}(t_{(k)_l}))$ 。

另由引理 4.2 可以得到  $\sum_{j=t_{(k)_{l-1}}}^{t_{(k)_l}-1} l(x^*(j | \tilde{x}(t_{(k)_{l-1}})), u^*(j | \tilde{x}(t_{(k)_{l-1}}))) \geq$

$l(x^*(t_{(k)_{l-1}} | \tilde{x}(t_{(k)_{l-1}})), u^*(t_{(k)_{l-1}} | \tilde{x}(t_{(k)_{l-1}}))) \geq \eta V(x^*(t_{(k)_{l-1}})) \geq \eta J^*(x(t_{(k)_{l-1}}))$ 。代入原式, 同时引入假设 4.3 与引理 4.1 中条件, 可以得到

$$\begin{aligned}
 & J^*(x(t_{(k)_l})) - J^*(x(t_{(k)_{l-1}})) \\
 & \leq V(\tilde{x}(t_{(k)_l})) - V(x^*(t_{(k)_l} | \tilde{x}(t_{(k)_{l-1}}))) - \eta J^*(x(t_{(k)_{l-1}})) \\
 & \leq L_V \|\tilde{x}(t_{(k)_l}) - x^*(t_{(k)_l} | \tilde{x}(t_{(k)_{l-1}}))\|^s \\
 & \quad - \eta J^*(x(t_{(k)_{l-1}})) \\
 & \leq \beta_{t_k} d - \eta J^*(x(t_{(k)_{l-1}}))
 \end{aligned} \tag{4-13}$$

证明完毕。

**定理 4.1** 若假设 4.1、4.2、4.3 成立，根据引理 4.1、4.2、4.3 可以得到，对于任意时刻状态  $x(i), t_{(k)_0} \leq t_{(k)_l} \leq i \leq t_{(k)_{l+1}} \leq t_{(k+1)_0}$  存在不等式

$$\|x(i)\|^s \leq \rho_M^{k+1} \|x(0)\|^s + \nu d \tag{4-14}$$

其中  $\rho_M$  是一个刷新间隔  $T_U$  中的衰减率上界， $\nu = \sum_{j=0}^k \rho_M^j \delta_{t_{(j)}}$ 。

**证明** 若要证明  $\|x(k)\|^2 \leq \rho_{p(t_{\xi_l})} \rho^\xi \|x(0)\|^2 + \nu(\xi_l)d$ ，不妨任取时刻  $i$ ， $t_{(k)_0} \leq t_{(k)_l} \leq i \leq t_{(k)_{l+1}} \leq t_{(k+1)_0}$ 。并设  $\tilde{x}(t_{(k)_l}) = \tilde{x}(t_{(k)_l} | t_{(k)_l} - \tau_{sa}^{t_{(k)}})$ ，根据引理 4.1 与 4.3 和假设 4.3，有

$$\begin{aligned}
 & \|x(i)\|^s \\
 & \leq \sum_{j=t_{(k)_l}}^{t_{(k)_{l+1}}-1} \|x(j)\|^s \\
 & \leq 2^s \sum_{j=t_{(k)_l}}^{t_{(k)_{l+1}}-1} \|x(j) - x^*(j | \tilde{x}(t_{(k)_l}))\|^s \\
 & \quad + 2^s \sum_{j=t_{(k)_l}}^{t_{(k)_{l+1}}-1} \|x^*(j | \tilde{x}(t_{(k)_l}))\|^s \\
 & \leq 2^s \sum_{j=t_{(k)_l}}^{t_{(k+1)_l}-1} \frac{1 - L_f^{j-t_{(k)_l} + \tau_{sa}^{t_{(k)}}}}{1 - L_f} L_\omega d \\
 & \quad + \frac{2^s}{\alpha_l} \sum_{j=t_{(k)_l}}^{t_{(k)_{l+1}}-1} l(x^*(j | \tilde{x}(t_{(k)_l})), u^*(j | \tilde{x}(t_{(k)_l}))) \\
 & \leq 2^s \left( \frac{\Gamma^{t_{(k)}}}{1 - L_f} - \frac{L_f^{\tau_{sa}^{t_{(k)}}} (1 - L_f^{\Gamma^{t_{(k)}}})}{(1 - L_f)^2} \right) L_\omega d + \frac{2^s}{\alpha_l} J^*(x(t_{(k)_l})) \\
 & \leq C^{t_{(k)}} d + \frac{2^s}{\alpha_l} ((1 - \eta)^{l-1} J^*(x(t_{(k)_l})) + \frac{1 - (1 - \eta)^{l-1}}{1 - \eta} \beta_{t_k} d)
 \end{aligned} \tag{4-15}$$

其中  $C^{t_{(k)}} = 2^s \left( \frac{\Gamma^{t_{(k)}}}{1 - L_f} - \frac{L_f^{\tau_{sa}^{t_{(k)}}} (1 - L_f^{\Gamma^{t_{(k)}}})}{(1 - L_f)^2} \right) L_\omega$ ，表示该调度策略下，一次完整的通信周期

$T_p$  产生的误差的系数。

假设系统开环状态下的发散率  $V(k+1) \leq \gamma V(k)$ ,  $\gamma > 1$ , 由引理 4.2, 可得

$$J^*(x(t_{(k)_1})) \leq V(x(t_{(k)_1})) \leq \gamma^{t_{(k)_1} - t_{(k)_0}} V(x(t_{(k)_0})) \leq \gamma^{t_{(k)_1} - t_{(k)_0}} \alpha_V \|x(t_{(k)_0})\|^s \quad (4-16)$$

若我们假设每一个完整刷新闻隔中的衰减率上界  $\rho_M$ ,

$$\begin{aligned} & \|x(i)\|^s \\ & \leq \frac{2^s}{\alpha_l} \gamma^{t_{(k)_1} - t_{(k)_0}} \alpha_V (1-\eta)^{l-1} \|x(t_{(k)_0})\|^s + \frac{\beta_{t_k}}{1-\eta} d + C^{t_{(k)}} d \\ & \leq \rho_M \|x(t_{(k)_0})\|^s + \delta_{t_{(k)}} d \end{aligned} \quad (4-17)$$

上式即为包含时刻  $i$  的调度刷新闻隔  $T_{U_k}$  中, 从本次调度开始系统状态  $x(t_{(k)_0})$  到  $x(i)$  的衰减表达式。同理可以向前递推直至初始状态  $x(0)$ 。可以得到

$$\|x(i)\|^s \leq \rho_M^{k+1} \|x(0)\|^s + \nu d \quad (4-18)$$

其中  $\nu = \sum_{j=0}^k \rho_M^j \delta_{t_{(j)}}$ , 证明完毕。

由于每一次调度刷新会产生一段时间的系开环, 因此刷新闻隔  $T_U$  不宜过短, 且由衰减率上界  $\rho_M$  可知, 刷新闻隔的确定还需要满足  $\rho_M < 1$ 。

**定理 4.2** 调度刷新闻隔  $T_{U_k}$  的长度可变, 只需满足条件  $T_{U_k} \geq \Gamma^{t_{(k)}} F + t_{(k)_1} - t_{(k)_0}$ ,

即可保证子系统在本次间隔中衰减率小于 1。其中  $F \geq 1 + \log_{\frac{\alpha_l \rho_M}{2^s \alpha_V \gamma^{t_{(k)_1} - t_{(k)_0}}}} \frac{\alpha_l \rho_M}{2^s \alpha_V \gamma^{t_{(k)_1} - t_{(k)_0}}}$ 。

**证明**  $\rho_{t_{(k)_0}^{t_{(k)_F}}}$  表示本次调度开始时刻  $t_{(k)_0}$  直至本次调度的最后一个时延周期  $t_{(k)_F}$  的衰减率。刷新闻隔需要保证每一个子系统在本次间隔中的衰减率  $\rho_{t_{(k)_0}^{t_{(k)_F}}} \leq \rho_M$ , 由

于  $\rho_{t_{(k)_0}^{t_{(k)_F}}} = \rho_{t_{(k)_0}^{t_{(k)_1}}} = \frac{2^s}{\alpha_l} \gamma^{t_{(k)_1} - t_{(k)_0}} \alpha_V (1-\eta)^{l-1} \leq \rho_M$ , 可解得最后一个时延周期开始时刻  $t_{(k)_F}$

中的序数  $F \geq 1 + \log_{\frac{\alpha_l \rho_M}{2^s \alpha_V \gamma^{t_{(k)_1} - t_{(k)_0}}}} \frac{\alpha_l \rho_M}{2^s \alpha_V \gamma^{t_{(k)_1} - t_{(k)_0}}}$ , 因此, 刷新闻隔  $T_{U_k} \geq \Gamma^{t_{(k)}} F + t_{(k)_1} - t_{(k)_0}$ , 证明完毕。

只要在满足以上条件的情况下, 调度刷新可时间触发也可以根据系统加入和退出事件进行触发。实际情况中, 频繁地刷新虽然能够以更新的信息安排调度, 但是刷新闻隔太短并不全是好处。频繁刷新占用控制器大量的计算资源, 正在工作的系统会有一段时间得不到控制量, 对系统性能影响也十分严重。一般可设置刷新闻隔远大于可能的预测周期。

### 4.5 数值仿真

在数值仿真中，我们假设网络有节点  $N=15$ 。仿真总时长为 800，并在第 400 步的时候刷新调度。假设在该网络中存在两个闭环系统  $S_1, S_2$ ，如图 4-5，两个系统分别从 0 时刻和 120 步开始工作。

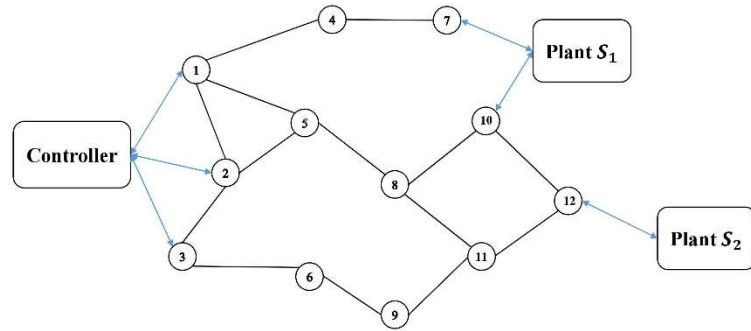


图4-5 网络化系统仿真样例

Figure 4-5. Networked systems for simulation

考虑两个系统的参数分别为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1.1 & 0.1 \\ -0.90 & 1.01 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} -0.4 \\ 0.1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1.1 & 0.2 \\ 0 & 1.2 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0.12 \\ 0.2 \end{bmatrix}$$

，初始条件分别是  $x_1(0) = [-1.5, 1]^T, x_2(0) = [1.5, -0.2]^T, \omega_1, \omega_2 \in [-0.015, 0.015]$ 。

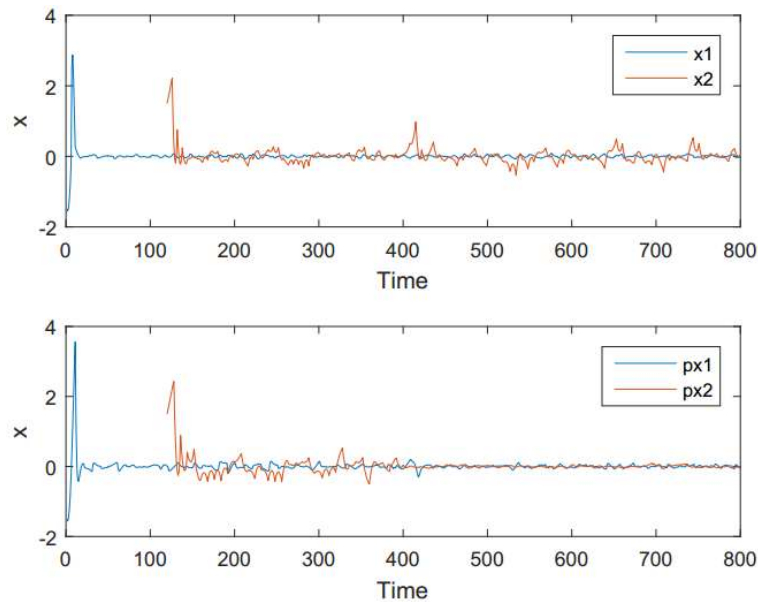


图4-6 (a) 随机调度策略下的系统轨迹 (b) 优先级调度策略下的系统轨迹

Figure 4-6. (a) System status track under stochastic scheduling strategies (b) System status track under priority scheduling strategies

由于仿真所用的都是带有干扰的系统,根据理论分析可知,采用基于包的模型预测控制器系统可以在有时延的情况下趋于稳定。但是系统的误差大小与时延关,当系统的闭环时延越短,其误差界就会越小。

图 4-6 (a) 中的网络采用了随机调度,该调度策略只保证网络通畅兼顾剩余能量。从中能够看出,无论是一开始就在工作的系统 1 还是新加入的系统 2,系统趋于平衡点之后,在调度刷新前后误差界均没有明显改变,甚至有所增加。

图 4-6 (b) 中的调度考虑到了接入系统的性能。当开始只有系统  $S_1$  工作时,调度策略  $\Psi = \{(v_1, v_5), (v_9, v_{11})\}, \{(v_1, v_2), (v_8, v_{10})\}, \{(v_5, v_8)\}, \{(v_2, v_4), (v_{11}, v_{12})\}, \{(v_1, v_4), (v_3, v_{15}), (v_8, v_{11})\}, \{(v_2, v_3), (v_4, v_7), (v_6, v_9), (v_{10}, v_{12})\}$ 。该调度生成时,仅考虑  $S_1$ , 其往返时延为  $6T_c$ 。120 步新加入的系统  $S_2$  往返时延为  $12T_c$ 。当调度刷新时,将同时考虑  $S_1, S_2$  性能,由于在计算时的  $S_2$  加权系数取的较大,所以使用贪心算法计算的新调度策略  $\Psi = \{(v_2, v_5), (v_9, v_{11})\}, \{(v_4, v_7), (v_5, v_8), (v_6, v_9)\}, \{(v_1, v_4), (v_8, v_{11})\}, \{(v_1, v_2), (v_8, v_{10})\}, \{(v_1, v_3), (v_3, v_6), (v_{10}, v_{12})\}, \{(v_2, v_3), (v_{11}, v_{12})\}$ 。此时  $S_1, S_2$  的往返时延分别是  $9T_c, 11T_c$ 。

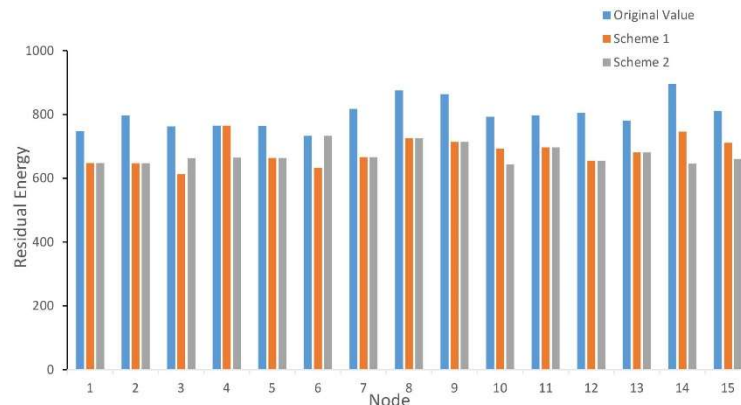


图4-7 两种调度策略下的节点能耗

Figure 4-7. Energy consumption under two scheduling strategies

图 4-7 中的横坐标代表节点编号,蓝色柱子表示仿真开始前的节点初始能量值,红色柱子代表采取了随机调度的节点能量变化,深色柱子代表使用了优先级调度的能量变化。两者的能量都有所下降,但是后者的方差较之前者变得更小,即网络能量分布变得更加均匀。

## 4.6 本章小结

本章中的协同设计兼顾考虑了多跳网络与控制系统的要求,联合设计了网络



调度策略和控制器。其中调度策略采取时隙分配的方法不仅避免了网络丢包问题，还能够根据设计者的偏好合理安排网络节点工作，成功地通过调度与控制器协同令网络与被控对象均获得令人满意结果。本章中共设计了两种调度算法，两种算法均可优化节点的工作安排以节能，但各有优劣。第一种调度方法侧重共享网络通信公平性，采取了随机策略，该方法没有针对控制系统做出针对性的优化；第二种调度方式则将各控制系统的状态纳入调度计算之中，相较于前一种策略跟侧重于优先保证系统性能。调度无法将通信时延消除，因此控制器采用了预测控制方法，通过打包控制量序列发送给执行器来填补可能出现的控制量缺失，使闭环系统达到稳定。通过稳定性分析也证明了该设计方法的可行性。最后，通过数值仿真表明了协同设计的有效性。

## 第五章 结论与展望

### 5.1 总结

本文总结回顾了前人的一些研究内容，在此基础上，重点对无线多跳网络控制系统中存在的能量限制、数据误码、通信时延等问题进行了深入研究，提出了相应的解决方法并进行了稳定性分析。本文研究成果总结如下：

1) 针对无线网络化控制系统中设备能量有限问题，设计了功率感知事件触发策略减少工作次数，并设计优化函数优化发送功率，达到了节能的目的，并分析证明了闭环系统的稳定性。最后，通过数值仿真例子验证了方法的有效性。

2) 针对无线多跳网络中节点能量有限与网络中不可忽略通信时延问题，改进了传统路由规则，使其可以在路径选择时同时兼顾考虑能量与时延因素，从而使网络能量分布更加均衡；设计了基于包的预测控制器以补偿通信时延造成的执行器控制量缺失，通过分析可以保证该设计下的闭环系统稳定。最后，通过数值仿真例子验证了方法的有效性。

3) 针对共享多跳网络的多个网络化控制系统中存在的节点能量有限、通信路径冲突、时延分析困难等问题，建立了多跳网络的数学模型描述节点的工作与通信链路，简化了时延的计算；设计了两种不同侧重的调度算法合理安排节点工作和通信链路，一种方法采取随机策略，侧重共享网络中通信的公平性，另一种方法将各控制系统的状态作为调度计算的决策因素之一，侧重于各控制系统的性能优化；设计预测控制器以补偿调度无法消除的通信延时；通过稳定性分析证明了以上方法的能够保证控制系统的稳定。最后，通过数值仿真表明了协同设计的有效性。

### 5.2 展望

目前越来越多的研究关注与网络与控制系统的协同设计。协同设计的思想能够兼顾网络与控制系统二者的性能需求，然而目前有许多协同设计仅仅是将网络部分的设计与控制系统部分的设计简单地相加，例如，首先分析计算控制系统允许的通信时延上限，再将网络参数设置为相应的数值，缺少了二者之间的耦合。而本文的研究虽有一部分带有二者耦合的协同设计，但仍在设计方面有所不足，导致在解该问题时可能需要启发式的优化方法，只能得到次优解。此外，在探讨网络对系统的影响时，没有全面考虑网络所带来的的多种影响，只是通过假设考虑部分

影响，存在一定的局限性。未来的研究方向如下：

1. 进一步研究无线多跳网络的建模方法。本文现有的建模方式可以描述该网络中信息转发次数和时延的关系，还可以表示节点当前剩余能量。然而这仅仅是网络中许多物理量的极小一部分，接下来的研究方向可以放在进一步深入了解网络结构和网络模型，总结更多对时延和能量有关的数学模型；也可以考虑更多控制系统有影响的例如丢包等在多跳网络中的成因，将其也加入现有的建模方式中，使之能够更完整地描述该网络中的各种物理量和参数，将其完善成一种更适用于该类网络化系统分析的框架

2. 本文的研究多着眼于无线多跳网络中的节点节能问题，节点能量有限这一情况多出现于分布广、成本低、节点计算和储存能力有限的网络中，如无线传感器网络等，这类网络有其自身的限制并不适合所有的控制系统接入，接下来的研究可以认真分析这类网络对控制系统会产生哪些无法通过调整参数化解的影响，探讨哪些控制系统适合使用该网络，哪些则不适合。

3. 本文所采用的的分析均建立在参数化模型的基础上，然而实际情况下通过系统辨识得到的模型精度无法保证，而本文的推导和结论多是通过标称模型，在实际环境中可能会无法达到设计的目标。在接下来的研究中，考虑在引入鲁棒控制等思想设计和分析，并对比先前的成果，使结论更具有实际意义。

## 参考文献

- [1] PARK P, ERGEN S C, FISCHIONE C, et al. Wireless network design for control systems: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 20(2): 978-1013.
- [2] YOU K Y, XIE L H. Survey of recent progress in networked control systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(2): 101-117.
- [3] YANG T. Networked control systems: a brief survey[J]. *IEEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 2006, 153(4): 403-410.
- [4] SHI J, WAN J, YAN H, et al. A survey of cyber-physical systems[C]. //Proceeding of 2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Nanjing: ZJU, 2011: 1-6.
- [5] HESPANHA J P, NAGHSHTABRIZI P, XU Y. A Survey of recent results in networked control systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1): 138-162.
- [6] 康军, 戴冠中. 网络化控制系统综合控制方法研究[J]. *控制与决策*, 2009, 24(2): 181-186.
- [7] 张国峰, 王光义, 宋强. 网络化控制系统: 建模, 分析与控制[J]. *信息与控制*, 2007, 36(3): 371-379.
- [8] 芮万智, 江汉红, 侯重远. 网络控制系统研究综述与展望[J]. *信息与控制*, 2012, 41(1): 83-88.
- [9] ZHANG L, GAO H, KAYNAK O. Network-induced constraints in networked control systems: a survey[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(1): 403-416.
- [10] DING S. A survey of fault-tolerant networked control system design[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, 45(20): 874-885.
- [11] 杨蒙蒙, 钱伟, 李冰锋. 时变时延网络化控制系统的镇定[J]. *控制工程*, 2018, 25(2).
- [12] 李玉清, 方华京, 朱菲. 随机时延网络化控制系统的自适应预测控制[J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2009, 37(1): 292-296.
- [13] 李炜, 李亚洁. 不确定网络化控制系统的保性能鲁棒容错控制[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(23): 7544-7548.
- [14] LINCOLN B, BERNHARDSSON B. Optimal control over networks with long random delays [C]. //Proceedings of the International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems. Perpignan: MNTS, 2000: 7.
- [15] BANOS A, PEREZ F, CERVERA J. Network-based reset control systems with time-varying delays[J]. *IEEE Transactions on Industrial informatics*, 2014, 10(1): 514-522.
- [16] BRANICKY M S, PHILLIPS S R, ZHANG W. Stability of networked control systems, explicit analysis of delay[C]. //Proceedings of the 2000 American Control Conference. Chicago: IEEE, 2000: 2352-2357.
- [17] NILSSON J. Real-time control systems with delays[D]. Sweden: Lund Institute of Technology, 1998.
- [18] 郭戈, 贾二娜. 网络化控制系统中的延时问题: 分析与展望[J]. *控制与决策*, 2009, 24(1): 1-6.
- [19] WALSH G C, YE H. Scheduling of networked control systems[J]. *IEEE control systems magazine*, 2001, 21(1): 57-65.
- [20] LIAN F L, MOYNE J R, TILBURY D M. Performance evaluation of control networks: ethernet,

- control net, and devicenet[J]. IEEE control systems magazine, 2001, 21(1): 66-83.
- [21] ZHANG W, BRANICKY M S, PHILLIPS S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE control systems magazine, 2001, 21(1): 84-99.
- [22] YUE D, HAN Q L, LAM J. Network-based robust  $H^\infty$  control of systems with uncertainty[J]. Automatica, 2005, 41(6): 999-1007.
- [23] CLOOSTERMAN M B, Van de WOUW N, HEEMELS W, et al. Stability of networked control systems with uncertain time-varying delays[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(7): 1575-1580.
- [24] ZHENG Y, FANG H, WANG H O. Takagi-sugeno fuzzy-model-based fault detection for networked control systems with markov delays[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2006, 36(4): 924-929.
- [25] ALMUTAIRI N B, CHOW M Y, TIPSUWAN Y. Network-based controlled DC motor with fuzzy compensation[C]. //IECON'01.27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat.No.37243). Denver: IEEE, 2001: 1844-1849.
- [26] HESPANHA J P, NAGHSHTABRIZI P, XU Y. A survey of recent results in networked control systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 138-162.
- [27] DU Z, YUE D, HU S. H-infinity stabilization for singular networked cascade control systems with state delay and disturbance[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 882-894.
- [28] YUE D, HAN Q L, LAM J. Network-based robust  $H^\infty$  control of systems with uncertainty[J]. Automatica, 2005, 41(6): 999-1007.
- [29] SHI Y, YU B. Robust mixed  $H_2/H^\infty$  control of networked control systems with random time delays in both forward and backward communication links[J]. Automatica, 2011, 47(4): 754-760.
- [30] ZHANG L, SHI Y, CHEN T, et al. A new method for stabilization of networked control systems with random delays[J]. IEEE Transactions on automatic control, 2005, 50(8): 1177-1181.
- [31] ZHANG X M, HAN Q L. Network-based  $H^\infty$  filtering for discrete-time systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(2): 956-961.
- [32] ZHANG W A, YU L. A robust control approach to stabilization of networked control systems with timevarying delays[J]. Automatica, 2009, 45(10): 2440-2445.
- [33] LIN X, HASSIBI A, HOW J P. Control with random communication delays via a discrete-time jump system approach[C]. //Proceedings of the 2000 American Control Conference. Chicago: IEEE, 2000: 2199-2204.
- [34] ZHANG L, SHI Y, CHEN T, et al. A new method for stabilization of networked control systems with random delays[J]. IEEE Transactions on automatic control, 2005, 50(8): 1177-1181.
- [35] 谢林柏, 方华京, 王华. 网络化控制系统的信息调度与稳定性研究[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 589-591.
- [36] ZHAO Y B, LIU G P, REES D. Integrated predictive control and scheduling co-design for networked control systems[J]. IET Control Theory Applications, 2008, 2(1): 7-15.
- [37] ZHAO Y B, LIU G P, REES D. Packet-based deadband control for internet-based networked control systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(5): 1057-1067.
- [38] ZHAO Y B, LIU G P, REES D. Design of a packet-based control framework for networked control systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(4): 859-865.
- [39] ZHAO Y B, LIU G P, KANG Y, et al. Stochastic stabilization of packet-based networked control

- systems[J]. International Journal of Innovative Computing Information & Control Ijicic, 2011, 4(5): 2441-2455.
- [40] ANWAR M, XIA Y. IEEE 802.15.4e lldn: Superframe configuration for networked control systems[C]. //Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. Nanjing: IEEE, 2014: 5568-5573.
- [41] ZHAO Y B, KIM J, LIU G P. Error bounded sensing for packet-based networked control systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1980-1989.
- [42] WILLIG A. Recent and emerging topics in wireless industrial communications: a selection[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2008, 4(2): 102-124.
- [43] GUNGOR V C, HANCKE G P. Industrial wireless sensor networks: challenges, design principles, and technical approaches[J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2009, 56(10): 4258-4265.
- [44] CHANG J H, TASSIULASL. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on networking, 2004, 12(4): 609-619.
- [45] PLOENNIGS J, VASYUTYNSKY V, KABITZSCH K. Comparative study of energy-efficient sampling approaches for wireless control networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2010, 6(3): 416-424.
- [46] PARK P, FISCHIONE C, BONIVENTO A, et al. Breath: An adaptive protocol for industrial control applications using wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(6): 821-838.
- [47] LU C, SAIFULLAH A, LI B, et al. Real-time wireless sensor-actuator networks for industrial cyber-physical systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(5): 1013-1024.
- [48] BAI J, EYISI E P, XUE Y, et al. Dynamic tuning retransmission limit of IEEE 802.11 MAC protocol for networked control systems[C]. //2010 IEEE/ACM Int'l Conference on Green Computing and Communications & Intl Conference on Cyber, Physical and Social Computing. Hangzhou: IEEE, 2010: 666-671.
- [49] PENG C, YANG T C. Event-triggered communication and  $H^\infty$  control co-design for networked control systems[J]. Automatica, 2013, 49(5): 1326-1332.
- [50] ZHANG L, HRISTU-VARSAKELIS D. Communication and control co-design for networked control systems[J]. Automatica, 2006, 42(6): 953-958.
- [51] REFAAT T K, DAOUD R M, AMER H H, et al. Wifi implementation of wireless networked control systems[C]. //2010 Seventh International Conference on Networked Sensing Systems (INSS). Kassel: IEEE, 2010: 145-148.
- [52] ARAÚJO J, MAZO M, ANTA A, et al. System architectures, protocols and algorithms for aperiodic wireless control systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 175-184.
- [53] ULUSOY A, GURBUZ O, ONAT A. Wireless model-based predictive networked control system over cooperative wireless network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(1): 41-51.
- [54] PARK P, ARAÚJO J, JOHANSSON K H. Wireless networked control system co-design[C]. // 2011 International Conference on Networking, Sensing and Control. Delft:IEEE, 2011: 486-491.
- [55] RABI M, STABELLINI L, PROUTIERE A, et al. Networked estimation under contention-based medium access[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal, 2010, 20(2): 140-155.

- [56] LIU X, GOLDSMITH A. Wireless network design for distributed control[C]. //2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control.Nassau:IEEE, 2004: 2823-2829.
- [57] GOKTURK M S, GURBUZ O. Cooperation in wireless sensor networks: design and performance analysis of a MAC protocol[C]. //2008 IEEE International Conference on Communications. Beijing: IEEE, 2008: 4284-4289.
- [58] KOTTENSTETTE N, KOUTSOUKOS X, HALL J, et al. Passivity-based design of wireless networked control systems subject to time-varying delays[J]. Real-time Systems Symposium. IEEE Computer Society, 2008, 8: 904-914.
- [59] BAI J, EYISI E P, QIU F, et al. Optimal cross-layer design of sampling rate adaptation and network scheduling for wireless networked control systems[C]. //Proceedings of the 2012 IEEE/ACM Third International Conference on Cyber-Physical Systems. Beijing: IEEE, 2012: 107-116.
- [60] ALUR R, D'INNOCENZO A, JOHANSSON K H, et al. Compositional modeling and analysis of multi-hop control networks[J]. IEEE Transactions on Automatic control, 2011, 56(10): 2345-2357.
- [61] 田中大, 高宪文, 史美华. 资源受限网络控制系统的模糊反馈调度[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(1): 94-101.
- [62] 王家栋, 汤贤铭, 俞金寿. 一种网络资源受限情况下的 NCS 反馈调度方法[J]. 信息与控制, 2008, 37(3): 339-345.
- [63] ARAUJO J. Design and implementation of resource-aware wireless networked control systems[D]. Stockholm, Sweden:KTH, 2011.
- [64] WITHEEPHANICH K, ESCANO J M, DE LA PENA D M, et al. A min-max model predictive control approach to robust power management in ambulatory wireless sensor networks[J]. IEEE Systems Journal, 2014, 8(4): 1060-1073.
- [65] SADI Y, COLERI ERGEN S. Energy and delay constrained maximum adaptive schedule for wireless networked control systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(7): 1-11.
- [66] TIBERI U, FISCHIONE C, JOHANSSON K, et al. Energy-efficient sampling of networked control systems over IEEE 802.15.4 wireless networks[J/OL]. Automatica, 2013, 49(3): 712-724.
- [67] GATSIS K, PAJIC M, RIBEIRO A, et al. Opportunistic scheduling of control tasks over shared wireless channels[C]. //2014 ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems. Berlin:IEEE,2014: 48-59.
- [68] WANG L, GUO G, ZHUANG Y. Networked control of battery-powered systems with communication scheduling and power allocation[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2017,27(17): 3488-3507.
- [69] D'INNOCENZO A, DI BENEDETTO M D, SERRA E. Fault tolerant control of multi-hop control networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013,58(6): 1377-1389.
- [70] QUEVEDO D E, NEŠIĆ D. Robust stability of packetized predictive control of nonlinear systems with disturbances and Markovian packet losses[J]. Automatica, 2012, 48(8): 1803-1811.

## 致 谢

写毕业论文致谢的机会不多，也许机缘巧合之下多年以后还有一次机会，如果真的出现了，那我必定先要感谢我的导师赵云波教授。

刚入学那会儿不懂什么是科研，一来觉得高不可攀，是那些教科书留名的大佬们干的事情，二来一开始也没打算朝这方面努力，读研只是为了找到更好的工作罢了。所幸我遇到了赵老师，赵老师为人和善，治学严谨，又富有洞察力，往往能从特别的角度找到新颖的研究方向。在老师的指导下，做研究是一件有意思的事情，让我受益良多并一度有了继续求学的想法，虽然最终没有实施，但我将始终以之为理想。

我十分感谢家人们对我求学的大力支持，是他们让我能够没有后顾之忧，可以全身心投入到学习和科研中来。

此外，感谢李鹏飞师兄在论文写作中的帮助，李师兄不仅推荐了许多参考书籍和论文，还经常十分有耐心地与我讨论，对我发现问题和寻找解决办法提供了巨大的助力。

最后还要感谢实验室的姚俊毅等同学，潘晓康等学弟学妹们，以及赵银等同学们在各方面给予的无私帮助，谢谢大家。



## 作者简介

### 1 作者简介

2011年9月——2015年6月，于华中农业大学工学院学习，自动化专业，获得工学学士学位。

2016年9月——2020年1月，于浙江工业大学信息工程学院学习，控制科学与工程专业，获得工学硕士学位。

### 2 攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] 赵云波, 袁征, 朱创. 无线网络化控制系统的功率感知事件触发策略及其闭环稳定性. 控制理论与应用.
- [1] P Li, Y Kang, YB Zhao, Z Yuan. Packet-Based Model Predictive Control for Networked Control Systems with Random Packet Losses. 2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC).

### 3 参与的科研项目及获奖情况

- [1] 基于资源调度和预测控制的无线网络化控制系统的联合设计, 国家自然科学基金基金项目。编号: 61673350。

## 学位论文数据集

密 级*	中图分类号*	UDC*	论文资助
公开	TP273	621.3	
学位授予单位名称	学位授予单位代码	学位类型*	学位级别*
浙江工业大学	10337	全日制学术型硕士	硕士
论文题名*	无线多跳网络控制系统中的调度与控制协同设计		
关键词*	无线多跳网络, 协同设计, 调度策略, 预测控制, 随机稳定		论文语种*
并列题名*	Codesign of Scheduling and Control in Wireless Multi-hop Networked Control System		中文
作者姓名*	袁征	学 号*	2111603083
培养单位名称*	培养单位代码*	培养单位地址	邮政编码
浙江工业大学 信息工程学院	10337	杭州市潮王路 18 号	310032
学科专业*	研究方向*	学 制*	学位授予年*
控制科学与工程	网络化控制	3 年	2020 年
论文提交日期*	2020 年 1 月		
导师姓名*	赵云波	职 称*	教授
评阅人	答辩委员会主席*	答辩委员会成员	
盲评	石崇源	赵云波、宣琦、周晓、陈晋音	
电子版论文提交格式: 文本 ( ) 图像 ( ) 视频 ( ) 音频 ( ) 多媒体 ( ) 其他 ( )			
电子版论文出版 (发布) 者	电子版论文出版 (发布) 地	版权声明	
论文总页数*	50 页		
注: 共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 22 项。			

