



浙江工业大学

# 硕士学位论文

论文题目：多径路由通信下网络化控制系统的  
协同设计与分析

作者姓名	姚俊毅
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：2019年06月

# Cooperative Design And Analysis of Networked Control Systems under Multipath Routing Communication

Dissertation Submitted to

**Zhejiang University of Technology**

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

**Master of Engineering**



by

**Junyi YAO**

Dissertation Supervisor: Prof. Yunbo ZHAO

Jun. 2019

## 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：姚俊毅

日期：2019年5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：姚俊毅

日期：2019年5月

导师签名：袁川

日期：2019年5月



中图分类号 TP273

学校代码 10337

UDC 621.3

密级 公开

研究生类别 全日制硕士研究生



浙江工业大学

硕士学位论文

多径路由通信下网络化控制系统的协同设计与分析

Cooperative Design And Analysis of Networked Control  
Systems under Multipath Routing Communication

作者 姚俊毅

第一导师 赵云波教授

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

答辩委员会主席 赵云波

答辩日期： 2019 年 5 月 15 日

## 多径路由通信下网络化控制系统的协同设计与分析

### 摘 要

在网络化控制系统中,传感器、执行器和控制器分布在不同区域,并通过无线网络形成相应的控制回路。其中,多径路由的传输方式在网络化控制系统中普遍存在,但是,现有的研究中却较少涉及。事实上,多数数据通信网络均为多跳网络,即从源节点到目的节点的数据传输需经过多个中继节点,而通信网络往往采取动态的路由发现机制,这就使得从任一源节点到目的节点的传输路径不唯一,即所谓“多径路由”。从通信网络角度看,多径路由对网络的负载均衡、路由可靠性等方面有较大帮助。但是,多径路由的存在对网络化控制系统的设计和分析带来了新的机遇和挑战。一方面,可以通过新颖的设计充分利用多径路由的特性以提高网络化控制系统的数据传输效率,另一方面,对多径的调度、分配和优化等也需要新的解决方法。

本文主要研究了多径路由通信下的网络化控制系统的协同设计问题。首先对多径路由网络化控制系统进行建模,从兼顾控制系统稳定性和有利于网络整体环境的角度出发,提出了多径路由调度算法和相关的控制器设计方法,不仅保证了系统的稳定性,并在考虑实时网络情况的前提下,实现了网络的优化。本文严格限制了网络的条件,未来将进一步放宽该限制,考虑在多径通信网络中使用竞争机制来处理同时的通道访问请求或者使用基于状态的优先级来确定对网络的访问顺序,从而可以得到更一般和普适的调度和控制协同设计算法。本文的主要工作和成果如下:

1. 研究了基于多径路由的网络化控制系统时延补偿问题,提出了一种新的多径路由随机时延建模方法。针对基于多径路由的网络化控制系统,对多径路由中存在的时延和丢包进行建模,强调由长时延和多路径丢包所导致的数据包乱序的影响,并将其建立成有限状态的 Markov 跳变系统的形式,然后采用基于包的控制方法针对不同的执行器端时延的情况设计控制器。该方法不仅保证了系统的稳定性,还实现了全局网络的负载平衡。最后使用纯数值仿真对方法的有效性和优越性进行了验证。

2. 研究了基于多径路由传输引发的多时延切换问题,提出了一种新的网络化控制系统的路径调度和控制协同设计方法。针对基于多径通信路由的网络化控制系统的通信路径调度和控制器的协同设计问题,通过将不同通信路径切换所带

来的时延变化建模为系统模态的切换,得到了所研究系统的切换系统模型,给出了使得闭环系统指数稳定的通信路径调度所需满足的条件,并提出了满足系统稳定和网络负载均衡的闭环通信路径调度方案和控制器设计方法。该方法不仅保证了系统的指数稳定性,并在考虑实时网络情况的前提下,实现了系统的局部最优。最后分别使用基于 MATLAB 的纯数值仿真和基于 LabVIEW 的虚拟仪器仿真对算法进行了验证,结果表明了协同设计方法的有效性和优越性。

**关键词:** 多径路由, 控制系统, 负载均衡, 协同设计, 指数稳定

# **COOPERATIVE DESIGN AND ANALYSIS OF NETWORKED CONTROL SYSTEMS UNDER MULTIPATH ROUTING COMMUNICATION**

## **ABSTRACT**

In networked control system, sensors, actuators and controllers are distributed in different areas, and corresponding control loops are formed through wireless networks. Among them, the transmission mode of multipath routing is ubiquitous in networked control systems, however, it is seldom involved in the existing research. In fact, most data communication networks are multi-hop networks, that is, data transmission from source node to destination node needs to pass through multiple relay nodes, and communication networks often adopt dynamic routing discovery mechanism, which makes the transmission path from any source node to destination node not unique, that is, the so-called "multi-path routing". From the point of view of communication network, multipath routing is of great help to load balancing, routing reliability and so on. However, the existence of multipath routing brings new opportunities and challenges to the design and analysis of networked control systems. On the one hand, we can make full use of the characteristics of multipath routing through novel design to improve the data transmission efficiency of networked control systems. On the other hand, we need some new solutions for multipath scheduling, allocation and optimization.

This thesis mainly studies the cooperative design of networked control systems in multipath routing communication. Firstly, the multi-path routing networked control system is modeled. From the perspective of both the stability of the control system and the overall network environment, the multi-path routing scheduling algorithm and related controller design methods are proposed. This not only ensures the stability of the system, but also realizes the optimization of the network considering the real-time

network conditions. This thesis strictly restricts the conditions of the network, the future research direction is to further relax the restrictions of the network, considering the use of competition mechanism to handle simultaneous channel access requests in multipath communication networks or the use of state-based priority to determine the order of access to the network, so that a more general and universal scheduling and control cooperative design algorithm can be obtained. The main work and achievements of this thesis are as follows:

1. The problem of delay compensation for networked control systems based on multipath routing is studied, and a new method for modeling stochastic time delay of multipath routing is proposed. Aiming at the networked control system based on multipath routing, this thesis models the delay and packet loss in multipath routing, emphasizes the effect of data disorder caused by long delay and multipath packet loss, and establishes it as a finite-state Markov jump system. Then, the controller is designed according to different actuator end delay by using the packet-based control method. This method not only guarantees the stability of the system, but also realizes the load balancing of the global network. Finally, the effectiveness and superiority of the method are verified by pure numerical simulation.

2. The multi-delay handover problem caused by multi-path routing transmission is studied, and a new path scheduling and control collaborative design method for networked control systems is proposed. Aiming at the problem of cooperative design of communication path scheduling and controller in networked control system based on multipath communication routing, the switching system model of the studied system is obtained by modelling the change of delay caused by different communication path switching as the switching of system mode. The conditions for exponentially stable communication path scheduling of closed-loop system are given, and the closed-loop communication path scheduling scheme and controller design method satisfying system stability and network load balancing are proposed. The results show that the collaborative design method is effective and superior. This method not only guarantees the exponential stability of the system, but also realizes the local optimum of the system considering the real-time network. Finally, the algorithm is validated by pure numerical simulation based on MATLAB simulation software and virtual instrument simulation based on LabVIEW.

**KEY WORDS:** multipath routing, control system, load balancing, collaborative design,

exponential stability

## 目 录

摘 要 .....	II
ABSTRACT .....	IV
插图清单 .....	IX
符号说明 .....	X
第一章 绪 论 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	3
1.2.1 网络化控制系统中时延和丢包的研究现状 .....	3
1.2.2 多径路由调度协议研究现状 .....	4
1.2.3 网络化控制系统协同设计研究现状 .....	5
1.3 相关理论和工具介绍 .....	6
1.3.1 马尔可夫跳变系统 .....	6
1.3.2 切换系统理论 .....	7
1.3.3 虚拟仪器仿真软件 .....	8
1.4 研究目的 .....	10
1.5 本文组织结构 .....	10
第二章 多径路由网络化控制系统的建模和稳定性分析 .....	12
2.1 多径路由网络化控制系统时延建模 .....	12
2.1.1 多径路由网络时延与丢包模型的建立 .....	13
2.1.2 执行器端时延模型的建立 .....	14
2.2 系统的稳定性分析和控制器设计 .....	16
2.2.1 闭环系统的模型 .....	16
2.2.2 控制器设计 .....	17
2.3 数值仿真 .....	18
2.4 本章小结 .....	21
第三章 多径路由网络化控制系统的路径调度与控制器协同设计 .....	23

3.1 问题描述 .....	23
3.1.1 闭环路径调度方案制器设计 .....	24
3.1.2 网络化控制系统建模 .....	24
3.2 稳定性分析 .....	25
3.2.1 系统的指数稳定性分析 .....	25
3.2.2 调度方案设计 .....	27
3.3 通信和控制的协同设计 .....	29
3.4 数值仿真 .....	30
3.4.1 MATLAB 数值仿真 .....	30
3.4.2 LabVIEW 虚拟仪器仿真 .....	33
3.5 本章小结 .....	36
<b>第四章 结论与展望 .....</b>	<b>38</b>
4.1 结 论 .....	38
4.2 展 望 .....	38
<b>参考文献 .....</b>	<b>40</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>45</b>
<b>作者简介 .....</b>	<b>46</b>
1 作者简历 .....	46
2 攻读硕士学位期间发表的学术论文 .....	46
3 参与的科研项目及获奖情况 .....	46
4 发明专利 .....	46
<b>学位论文数据集 .....</b>	<b>47</b>

## 插图清单

图 1-1	网络化控制系统结构框图.....	2
图 2-1	基于多径路由的网络化控制系统结构图.....	12
图 2-2	同一路径的单径冲突.....	14
图 2-3	执行器端时延情况.....	19
图 2-4	基于执行器端时延的方法和传统控制方法的比较(a).....	20
图 2-5	基于执行器端时延的方法和传统控制方法的比较(b).....	20
图 2-6	基于执行器端时延的方法和预测控制算法的比较(a).....	21
图 2-7	基于执行器端时延的方法和预测控制算法的比较(b).....	21
图 3-1	多径路由网络化控制系统结构图.....	22
图 3-2	协同设计算法轨迹图.....	31
图 3-3	协同设计算法与同代价值方案状态轨迹对比.....	32
图 3-4	协同设计算法与相近稳定性方案对比.....	32
图 3-5	三种不同方案的代价值对比.....	33
图 3-6	MATLAB 与 LabVIEW 联合仿真系统结构图.....	34
图 3-7	LabVIEW 具体实施框图(a).....	34
图 3-8	LabVIEW 具体实施框图(b).....	35
图 3-9	LabVIEW 具体实施框图(c).....	35
图 3-10	协同设计算法倒立摆运行图.....	36
图 3-11	同代价值方案倒立摆运行图.....	36

## 符号说明

$A \in \mathbb{R}^{m \times n}$	——	$A$ 为 $m \times n$ 维的实矩阵;
$P$	——	丢包率;
$\tau_i$	——	路径时延;
$n_i$	——	路径 $i$ 中节点数量;
$p_i^t$	——	路径 $i$ 中节点 $t$ 的剩余能量值
$f$	——	两个节点之间进行通信的能量消耗;
$p_{ji}$	——	时延的状态转移概率;
$\pi_\tau$	——	时延的状态转移概率矩阵;
$I_n$	——	$n \times n$ 维的单位矩阵;
$\mathbb{N}$	——	含 0 在内的所有自然数集合;
$P \geq 0 (P > 0)$	——	方阵 $P$ 是对称正半定 (正定);
$\mathbb{R}^m$	——	$m$ 维实向量空间;
$T$	——	调度周期;
$\mathcal{P}_{i_j}$	——	第 $i$ 个周期内第 $j$ 次选择的闭环通信路径;
$\in$	——	‘属于’;
$\zeta_T^i$	——	闭环路径在第 $i$ 个周期的调度方案;
$\ \cdot\ $	——	欧几里德范数;

# 第一章 绪 论

## 1.1 研究背景

过去的几十年中，通信和计算技术取得了巨大的进步。当今的工业控制系统使用了许多分布在不同地区的传感器和执行器来连续地监测和控制物理过程，虽然传感器和执行器已经变得越来越智能，但是工业界传统上仍然依靠有线通信基础设施在各个系统组件之间交换信息，这无法避免物理布线的复杂设置和高昂的维护成本。低成本无线通信技术的出现，为改变自动化和控制提供了更多的可能性。无线通信技术的应用降低了电缆、连接器等设备的成本，并且由于其消除了传统有线控制体系结构的限制，故具有减少布线、快速部署、灵活安装、以及提高传感器和控制器的放置自由度等优势，从而可以产生更低成本以及更高效率的系统。虽然自 70 年代以来，有线通信在工业控制系统中已经得到了广泛的应用和部署，但是将无线通信技术集成到工业控制系统中的经济效益是显而易见的。家庭和办公室应用中无线部署的巨大成功提高了消费者对无线技术的信心。标准化、低成本的无线网络的出现，使工业无线比有线通信更具经济吸引力。在家庭和办公室使用低功率无线技术是一种高效低价的传统通信技术的替代工具，例如在智能家居等方面就用到了大量的无线通信技术。

计算机和通信技术的进步为控制系统提供了低成本和低功耗的无线通信技术，使控制系统能够通过高效的通信网络交换信息，这导致了网络化控制系统的诞生。网络化控制系统的组成部分如传感器、执行器和控制器分布在不同区域，并通过无线网络形成相应的控制回路<sup>[1]</sup>，如图 1-1 所示。这类控制系统的直接例子是在伊利诺伊大学的 IT 融合实验室中建立的自动交通控制系统。然而，技术的改进和更严格的要求使得网络化控制理论的研究更加困难。问题的一部分是由于系统对数据传输速率、抖动、延迟和数据丢失的严格要求，以确保控制系统的性能，另一部分是，在无线传感器网络上开发具有鲁棒性和高效率的网络化控制系统是对无线传感器网络原有路由协议的一个挑战。因此必须满足来自两个领域，即通信网络和控制系统的紧迫要求。从控制的角度来看，控制器对系统的各方面了解和掌握越详细，可以获得更优的控制性能，这可以通过增加传感器数量或更频繁地发送传感器测量值来实现。从网络的角度来看，当数据传输有更快的数据速率和更低的路径延迟时，可以增强系统鲁棒性，这可以通过开发合适的路由调度协议

来解决这个问题，其主要职责是数据速率和路径延迟优化。但是这两个方面都对控制系统中的控制器性能和无线网络节点的能耗有重大影响，节点能耗是无线传感器网络中节点和网络寿命的关键问题，因为节点通常由电池供电，在许多情况下，更换这些电池相当困难，其成本十分高昂。我们需要将控制系统和通信网络进行协调，以便根据控制性能要求尽可能多的优化网络和提高灵活性<sup>[2-7]</sup>。

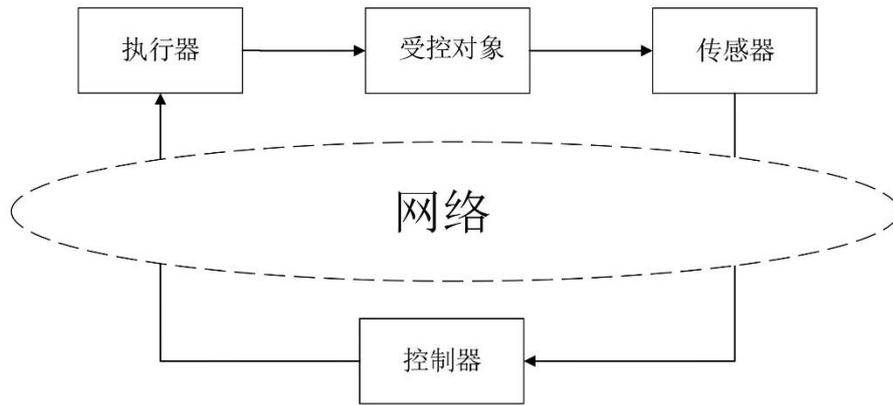


图1-1 网络化控制系统结构框图

Figure 1-1. Structural block diagram of networked control system

网络化控制系统具有广泛的应用，包括电力网络<sup>[8]</sup>、运输网络<sup>[9]</sup>、工厂自动化<sup>[10]</sup>、远程操作<sup>[11]</sup>、传感器和执行器网络<sup>[12]</sup>和移动自主机器人<sup>[13-15]</sup>。因此这需要大力发展网络化控制理论。网络化控制系统的理论研究处于控制和通信两门学科的交叉点，在研究网络化控制系统理论时，需要将这两个框架结合起来对控制系统进行实际建模。在传统控制理论中，许多结果都依赖于完美传输的假设，例如组件（如受控对象和控制器）之间的信息传输是无损的，因此传统控制理论中的成果无法直接应用在网络化控制理论系统中，网络化控制系统的理论发展需要另起炉灶。当今，网络化控制文献可分为两大类。第一组集中于解决由网络通信缺陷引起的约束，包括时间延迟、包丢失和无序、时变传输、采样间隔、多个节点访问网络的竞争和数据量化<sup>[16-22]</sup>。第二组将网络纳入理论体系，考虑网络拓扑结构，并研究网络的拓扑结构如何影响整体网络行为，以及如何设计控制网络以实现稳定性或期望性能。另外，由于网络化控制本身是一个跨学科的研究，它需要很好地理解控制和通信之间的相互作用。目前，这两门学科的工程师处理在设计无线网络控制系统时出现了许多矛盾。一方面，通信工程师试图设计新的调度算法以

满足更高的传输可靠性要求，同时减少端到端延迟和电池功耗。另一方面，控制工程师正在开发新的控制器设计算法，以提高闭环控制系统对诸如延迟、数据丢失、数据量化和时变采样等缺陷的鲁棒性。因此，需要结合这两门学科理论来解决这个矛盾。

## 1.2 国内外研究现状

针对本文课题所涉及的领域，国内外已经出现相当数量的研究成果，在接下来的内容中，我们将对其进行详细的描述和介绍。

### 1.2.1 网络化控制系统中时延和丢包的研究现状

在上述段落中，我们讨论了无线网络通信会对控制系统造成的影响，因此在设计控制器时必须考虑这些问题。网络本身就是有损的，导致数据包丢失，并且每个数据包通常都受到信道访问和传输延迟的影响<sup>[23-34]</sup>。此外，设备故障和意外也可能会严重降低闭环系统的性能。因此，必须设计出适当补偿这些缺陷的方法。

在网络化控制系统出现以来，时延以及丢包一直是备受重视的研究重点，对于时间延迟，主要工作重心放在其时变的特性之上，尤其关注时变时间延迟的稳定性研究<sup>[35-37]</sup>。Schenatoet 等人研究了具有时变时延的网络在控制系统反馈回路中的影响，通过对网络建立时变时延和随机丢包模型，并使用具有马尔可夫跳跃参数的离散线性系统进行描述，推导了离散时间跳跃系统最优控制器综合的充分必要线性矩阵不等式 (LMI) 条件<sup>[9,38,39]</sup>。Zhang 等人研究了一类具有随机时滞的离散时间域网络化控制系统的稳定性问题，建立了稳定控制器存在的充分必要条件，并采用迭代线性矩阵不等式计算状态反馈增益<sup>[40-42]</sup>。Lampersk 等人针对分布式系统给出了时变时延的显式解决方案，进行具有通信延迟的分布式和分散控制器的设计<sup>[43,44]</sup>。尽管人们已经广泛研究了短延迟的影响，相较而言，长延迟和无序消息的影响并没有受到控制社区的充分关注。当时变时延大于一个采样周期时，后发送的数据包可能会比新发送的数据包更快到达执行器端，在一个采样周期内可能会有多个控制信息到达执行器，这会导致控制信息的时序错乱问题。针对此类问题，Liu 等人建立了一种新的模型来描述当随机延迟大于一个采样周期的网络化控制系统，其将随机延迟模型描述为马尔可夫链的形式，将闭环系统描述为马尔可夫跳跃系统，利用后退优化原理，给出了闭环网络化控制系统随机稳定和性能指标上界的充分条件<sup>[45,46]</sup>。

虽然随着网络技术的发展，网络的可靠性日渐提升，但在实践中数据包丢失是不可避免的。数据包丢失是由于数据流量拥塞、数据冲突或干扰造成的<sup>[47-50]</sup>。尽管许多通信协议都提供了传输重试机制，但它们只在有限的时间内重新传输不成功

的消息，如果所有重新传输尝试都失败，则数据包将被丢弃。因此，无线网络化控制系统必须考虑数据包丢失。Xiong 等人研究了以丢包问题为核心的网络化控制系统的稳定性问题，考虑了两种类型的数据包丢失过程，一个是任意丢包过程，另一个是马尔可夫丢包过程，利用一种与丢包相关的李雅普诺夫方法，建立了具有任意丢包和马尔可夫丢包的网络化控制系统的稳定性条件，并根据稳定条件，给出了相应的稳定控制器设计方法<sup>[51-53]</sup>。Ding 等人通过将丢包系统的稳定转化为一组系统的鲁棒稳定，给出了丢包系统的一个新的稳定性条件，提出了一种将无限视界控制参数化为单状态反馈规律的 MPC 综合方法<sup>[54,55]</sup>。

### 1.2.2 多径路由调度协议研究现状

在网络化控制系统中，网络通常由大量能够执行传感和通信任务的小功率设备组成。这类无线设备通常被称为节点，它们自发地形成一个网络，而不需要任何基础设施，因此可以构建一个多跳无线网络<sup>[56-58]</sup>。无线网络中节点的主要任务是收集、处理和传输包括物理参数和事件在内的数据包到目的节点，在那里收集的信息可用于各种目的。但是这种网络除了具有移动自组网等传统无线网络的共同特点外，还具有能量和带宽资源非常有限、节点部署密度高、节点价格昂贵、不可靠等缺陷，容易发生故障。由于这些区别于其他网络的固有特性，多跳网络中的路由问题非常具有挑战性。最重要的是，由于传感器节点的数量相对较大，因此不可能为所有节点建立全局寻址方案，而是找到从源节点到接收节点的多条路径，从源节点到目的节点的数据传输需经过多个中继节点，而通信网络往往采取动态的路由发现机制，这就使得从任一源节点到目的节点的传输路径不唯一，即所谓“多径路由”。相较于单路径路由协议在过去被大量讨论和研究，如今，多径路由协议逐渐成为研究的热点。

通过上述介绍，我们知道网络化控制系统中的数据传输大多通过多径路由进行，但现有的网络化控制系统研究中对于多径路由却较少涉及。多径路由的存在减少了路由发现延迟和路由开销，但是多径路由的优点在某些时候也会转变为一个极大的挑战，这种转变的主要原因在于当前协议路由的流量不可知性，这使得它们的路由决策完全基于实时的网络情况，从而完全忽略实际的流量需求和链路利用。在许多情况下，这可能是一个主要的缺点，因为网络的某些部分可能由于流量负载过大而变得拥挤，同时网络其余部分可能负载不足，导致网络的全局负载失衡，从而浪费了大部分已安装的网络容量<sup>[59-64]</sup>。

多径路由这种模式的成功和广泛部署，很大程度上需要取决于强大而高效的网络协议的实现。因此对于如何选取从端节点到目的节点的路径，即路由调度协议的研究，一直是网络开发的核心课题<sup>[65-66]</sup>。就因特网而言，通常会设定一个链路权重值，例如节点剩余能量等，再将此标量值与网络中的每个链路及其路径相关联，

通过确定一对节点之间的链路权重之和最小来找到最优路径，这就基本上将网络中的路由问题归结为在有向加权图中寻找最短路径<sup>[67-69]</sup>。通过上述标准科研界已经开发了一些协议，这些协议具有自动建立路由（即不需要人工配置）和在网络节点变化的情况下快速重新配置路由的基本任务。通常可以概括为两大类协议：基于 Bellman、Ford 和 Fulkerson 理论工作的距离向量协议和基于 Dijkstra 算法的链路状态协议<sup>[67-69]</sup>。由于后者具有更高的计算效率，因此最终占据优势地位，导致其成为如今大多数协议部署的标准，如最短路径优先（OSPF）<sup>[70,71]</sup> 和中间系统到中间系统（IS-IS）<sup>[72]</sup>等。多径路由相对单路径网络主要存在以下几个优势：

**负载均衡：**多径路由可以避免拥塞，提高性能。当某些节点和链路由于过度利用以及相互影响导致拥塞时，多径路由可以通过交替使用不同路径传输数据包以平衡这些路径上的负载。在无线传感器网络中，多并行处理的主要重点通常是负载均衡问题。由于节点受限于有限的能量（无线节点网络主要通过电池进行供电，更换电池殊为不易，因此网络中能量十分有限），并且由于网络中数据包流量不高，因此主要问题是如何保持网络可运行的最长时间，即网络寿命。在传感器网络中，必须处理多个节点产生的流量，并且试图将数据传递给一个或多个节点。通常按需路由方案倾向于始终使用相同的节点转发分组集，这会导致许多其他节点根本没有被使用，这就导致了网络能耗不平衡。多径路由可以很好的解决这个问题，从而增加网络的寿命。

**容错性：**多路径路由协议通过将冗余信息传输到目的地，提高容错性。虽然这种行为增加了能量开销，但有助于减少数据包丢失的概率，并且可以避免在某条链路故障的情况下丢失数据包，现在科研界已经开发了许多复杂的算法来提高传输的可靠性。比如 Fulkerson 等人特别研究了在发送额外数据包时产生的开销和可靠性增益之间相互转化的平衡<sup>[68]</sup>。

**带宽聚合：**通过将同一目的地的数据包分派到不同的路径中实现。特别是当节点具有多个低带宽链路，但需求却比每个单独链路所能提供的带宽更高时，该策略尤其有益。

**减少延迟：**在无线网络中运行单路径按需路由协议时，一旦产生路由故障，将触发路径发现机制来寻找新的路由，这会导致路由发现延迟。通过多径路由的使用，可以有效减少延迟，因为在多径路由中，可以通过及时启用备用路径来替代之前所使用的路径。

### 1.2.3 网络化控制系统协同设计研究现状

网络化控制系统中具有挑战性的部分是设计可以在无线网络上可靠运行的控制器。从根本上说，网络限制了网络化控制系统各个器件中可以交换的信息量，更简单地说，通信占用时间，并且不确定数据包是否丢失。这些由网络诱发的潜在因

素往往随着时间和网络负载而变化,并且对控制性能有至关重要的影响。通常,在控制器设计过程中,很自然地会将网络看成是给定的烦扰,并试图设计对网络异常情况具有鲁棒性的控制律来解决这些网络缺陷。在过去,为了简化分析,通常会忽略具体网络环境的影响。基于诸如采样周期和网络环境的一些假设,控制系统设计和网络调度设计通常被分离开来<sup>[73]</sup>,导致这些被忽略的网络条件往往会对系统造成较大的影响,因此在进行网络化控制系统的设计时,必须考虑许多参数并设计其中的权衡,这些设计决策就影响网络中数据包的延迟和丢失,从而影响控制性能。由于协同设计包括网络配置、路由协议、采样策略和控制算法的选择,它可以变得相当复杂。因此,需要一个目标函数,并试图理解如何将不同的设计模块组合成一种具有一个相同目标的模块。具体而言,我们考虑控制律和路由调度协议的协同优化设计,即研究网络延迟和丢包对控制性能的影响,并尝试设计减少网络负载的新调度策略。网络化控制系统的理想解决方案将尝试同时优化网络情况以及控制性能。然而,一般而言需要在这两者之间有一个固有的折衷<sup>[74,75]</sup>,这通常可以转化成对上述目标函数求解最优值。此外,试图将网络和控制的性能推到极值通常会导导致具有高能耗的网络。故此,综合考虑性能和资源调度的网络化控制协同设计被提出<sup>[76]</sup>,并且越来越受到重视。

从通信网络角度看,本文研究课题中多径路由的引入对网络的负载均衡、路由可靠性等方面有较大帮助。但是,多径路由的存在对网络化控制系统的设计和分析带来了新的机遇和挑战。一方面,可以通过新颖的设计充分利用多径路由的特性以提高网络化控制系统的数据传输效率,另一方面,对多径的调度、分配和优化等也需要新的解决方法。对网络化控制系统中多径路由的研究需要深入分析通信网络的特性,通常需要采用上述提到的同时考虑通信和控制的协同设计方法。针对常规通信限制已有大量协同设计方法。例如,Dai将调度与控制相结合,在路径数量及功率受限的情况下设计调度方案以及控制器,取得了较好的控制效果<sup>[77]</sup>;Li考虑了具有时变时延的无线传感器网络<sup>[78]</sup>,提出了多跳以及星型拓扑两种体系结构,分别寻找其最优的事件触发条件;Wei通过对共享总线进行建模,将其转化为衰落信道的形式,得到了满足多输入网络化控制系统稳定的最小信道容量<sup>[79]</sup>。但是,多径路由的存在给闭环系统带来了新的特点,特别的,路径的选择需要显式并动态的在控制系统的设计中进行考虑,这使得上述传统方法无法简单套用。

## 1.3 相关理论和工具介绍

### 1.3.1 马尔可夫跳变系统

对概率的研究大多涉及独立的试验过程,这些过程是经典概率论和统计学的

基础。数学界讨论了这些过程的两个主要定理：大数定律和中心极限定理。可以看到，当一系列随机试验形成一个独立的试验过程时，每个试验的可能结果是相同的，并且以相同的概率发生。此外，对先前实验结果的了解不会影响对下一个实验结果的预测。原则上，当我们观察一系列随机实验时，所有过去的结果都会影响对下一个实验的预测。例如，在预测一个学生在一门课程的一系列考试中的成绩时，通常会以他上一次的考试成绩作为参考。但是，如果允许这种普遍性，就很难证明一般的结果。1907年，一种重要的新型偶然过程被提出：在这个过程中，给定实验的结果会影响下一个实验的结果。这种过程称为马尔可夫过程。

马尔可夫过程是以俄罗斯数学家安德烈·马尔可夫的名字命名，是一个满足马尔可夫性质的随机过程。粗略地说，如果一个过程仅仅基于它的当前状态就可以预测它的未来，就像我们可以知道这个过程的完整历史一样，那么它就满足马尔可夫性质，它的未来和过去的状态是独立的，以系统的当前状态为条件。马尔可夫过程是广义随机模拟方法-蒙特卡罗的基础，用于从复杂概率分布中模拟抽样，其在贝叶斯统计中得到了广泛的应用。最著名的一个马尔可夫过程是马尔可夫链。马尔可夫链是一种具有离散状态空间或离散索引集（通常表示时间）的马尔可夫过程，但马尔可夫链的精确定义各不相同。例如，通常将马尔可夫链定义为具有可数状态空间的离散或连续时间的马尔可夫过程。

马尔可夫跳变系统则是一种具有多个模态的随机系统，系统在各个模态之间的跳变转移是由一组马尔可夫链来决定的。在网络化控制系统中，对时延，尤其是时变时延的建模研究是一个至关重要的问题，由路由协议中的调度或竞争所引发的通信时延往往可以建模为马尔可夫跳变系统模型，然后通过观测得到的时延切换 Markov 状态转移矩阵，可以计算得到控制器设计方案。马尔可夫跳变系统模型还被广泛应用于经济学、博弈论、排队（沟通）理论、遗传学和金融学。另外，马尔可夫跳变系统模型还有很多其他的应用，我们在日常生活中甚至没有意识到它。谷歌公司的 PageRank 算法是马尔可夫跳变系统模型最著名的用例之一。谷歌为所有网站编制了索引，并创建了一个关于网页跳转的状态转移矩阵。站点上的任何用户表示一个阶段，而转移矩阵表示用户从当前站点移动到其他站点的概率。马尔可夫跳变系统也被用于市场营销领域，电子商务公司正利用它的能力来定义客户生命周期的不同阶段或预测客户流失概率。

### 1.3.2 切换系统理论

切换系统是由切换信号和切换子系统所组成的一个系统，它为许多物理或人工系统的数学建模提供了一个统一的框架，诸如电力电子、飞行控制系统和网络化控制系统等<sup>[80-83]</sup>。不同系统模式之间的切换会使切换系统显示出非常复杂的动态行为，如混沌、天顶、多极限环等现象。切换系统的复杂性体现在：就切换系统的

稳定性而言,对于由稳定子系统组成的系统,其稳定性不能得到保证;不稳定子系统之间的切换却可能导致整个切换系统的稳定。各种切换信号将切换系统与一般时变系统区分开来,因为前者的解不仅依赖于系统的初始条件,而且还依赖于子系统间切换的切换信号。切换系统的动态特性是由切换信号和切换子系统共同决定的,其中切换信号是切换系统中最重要的因素,它给切换系统的控制问题带来了一些特点和困难。

根据切换信号的不同形式,切换系统的子系统切换过程可以分为两类:自主交换和主动交换。前者是切换系统的切换规律,不受外部切换逻辑的影响,只显示系统本身的特性,自主切换可以是任意切换、随机切换、时变切换、状态相关切换等。后者代表设计者根据某些控制目的而主动设计的切换规则,主动切换主要包括状态驱动切换、时变切换和事件驱动切换等。除前馈控制和反馈控制等传统控制方法外,主动切换设计为切换系统提供了另一种有效的控制策略以达到理想的状态或性能。两者在网络化控制理论体系中扮演了不同的角色,当给定具体的网络环境设定,例如随机时延系统,研究者通常采用自主切换系统对其模型进行描述,从而得到相应的控制器设计方案。然而,当涉及到协同设计理论时,研究者往往通过选择合适的切换信号作为协同设计的切入点,将模型建立为主动切换模型,并通过对切换策略的一维搜索找到协同设计的最优解决方案。

在切换系统中,两类切换信号的系统稳定性问题一直是科研界研究的热点问题。在连续时间域和离散时间域中,非受控切换信号下的系统已经获得了大量的理论结果。然而,对于具有受控切换信号的切换系统,在寻找合适的切换信号以保证系统稳定和提高系统性能方面比较复杂。在实际应用中,经常遇到对切换时刻有限制的时间约束开关信号,这引起了人们的广泛关注。对于切换系统,科研界提出了一种称为停留时间的最小时间间隔理论,利用多个李雅普诺夫函数证明了,当停留时间 $\tau$ 足够大时,具有稳定子系统的切换线性系统是指数稳定的。然而,在许多实际的切换系统中,指定固定的停留时间往往不具有可行性。于是研究者们将平均停留时间的概念扩展到允许停留时间小于某个固定常数,本文利用切换系统的平均停留时间验证了多径路由网络化控制系统的指数稳定。

### 1.3.3 虚拟仪器仿真软件

虚拟仪器的概念诞生于 20 世纪 70 年代末,当时微处理器技术的飞速发展使得通过改变软件来改变机器的功能成为可能,因为虚拟仪器的功能几乎不依赖于专用硬件—通常只有特定应用领域的信号调节模块和用作外部世界接口的模数转换器,因此虚拟仪器具有相当大的灵活性。自从 21 世纪以来,越来越多的应用程序使用虚拟仪器对复杂现象进行模拟和仿真,并以此降低设备和程序的成本。虚拟仪器将计算机技术等主流商业技术与灵活的软件以及各种各样的传感器和控制器

相结合，因此工程师和科学家可以创建满足其应用需求的低成本、高效率系统。通过虚拟仪器，工程师和科学家减少了开发时间，设计了更高质量的产品，并降低了他们的设计成本。综上所述，虚拟仪器是指将通用计算机和 workstation 以及数据结合起来，通过传感器设备和虚拟仪器软件，构建的一套集成仪器系统。在这样一个系统中，数据采集硬件设备结合传感器元件，监测受控对象的状态变化。这些硬件设备与计算机紧密相连，传感器的操作由计算机软件控制，数据采集设备的输出则显示在计算机屏幕上，并使用显示器模拟物理表盘、仪表和其他所需要的外观。虚拟仪器系统还包括纯软件仪器，如示波器和频谱分析仪，用于处理采集的传感器数据，以使用户充分利用数据。因此，虚拟仪器作为专门为计算机控制和操作而设计的数据采集仪器被开发升级，并在商业市场上大量投入使用。

LabVIEW 虚拟仪器仿真设备被设计用于从环境或被测单元收集数据，并根据收集的数据向用户显示信息的一种主流虚拟仪器软件。该仪器可使用传感器来感知物理参数（例如温度或压力）的变化，并将所感知的信息转换为电信号，例如电压或频率变化。LabVIEW 仪器也可以分析从另一个仪器获得的数据，然后将处理后的数据输出到显示或记录设备的物理软件设备。LabVIEW 虚拟仪器是一个跨学科领域模型，它融合了传感、硬件和软件技术，以便为控制和监控应用创建灵活和复杂的仪器<sup>[84]</sup>。本质上，LabVIEW 是一种支持 G 语言编程的环境，G 语言是一种由 NI 公司创建的图形编程语言，最初是通过 GPIB 开发，但此后它得到了相当大的更新。目前，G 语言可用于自动化测试应用、通用数据采集、编程 FPGA 等。LabVIEW 其实就是 G 的用户界面。但是随着软件的发展，LabVIEW 这个术语现在与 G 语言同义。LabVIEW 还提供了许多其他功能，包括调试、自动多线程、应用程序用户界面、硬件管理和系统设计界面。通过这种方式，LabVIEW 逐渐成为各种自动化硬件设施的管理页面，也在仿真实验中被大量使用以节省硬件资源。

在 LabVIEW 虚拟仪器中，可以通过 DLL 调用和 COM 组件技术进行 MATLAB 和 LabVIEW 的混合编程，从而可以结合两者的优点，进行更加完善的仿真验证。本文通过使用 LabVIEW 中的 MALTAB Script 插件直接编写 MALTAB 脚本，实现 MATLAB/LabVIEW 联合仿真，验证算法的有效性。相较于纯 MALTAB 数值仿真，其主要具有下面两点优势。

- (1) 更为真实的模拟了受控对象；
- (2) 计算资源的具体定量描述也更为真实，因此可更有效的验证本文中提出的控制策略和算法。

## 1.4 研究目的

控制系统中的问题一般被表述为给定环境下的控制器设计问题。在网络化控制系统中，除了设备和控制器之外，反馈系统还有一个附加部分，即用于信息交换的通信网络。在网络化控制理论中，如果通信网络无法预先确定，由网络所产生的控制问题通常是很难解决的。为了解决这一挑战，科研界提出了通信和控制协同设计理论，对系统重新制定网络控制方案。具体来说，即允许网络设计与控制器设计同时进行。根据所采用的通信协议的不同，通信网络的设计可以在不同的上下文中有不同的含义。例如，它可以参考信道容量分配、传输调度和编码机制等，这种多样性导致了不同形式的通信和控制协同设计方法。另外，由于单路径网络较为简单，且网络化控制系统中主要涉及的通信网络类型为多径路由网络，因此本文主要研究特定多径路由下的控制系统协同设计，并同时优化全局网络和控制系统的性能。本文的研究为进一步加强网络控制问题的研究以及加深通信和控制理论的紧密联系提供了更多的成果。

## 1.5 本文组织结构

本文研究了基于多径路由的网络化控制系统的协同设计问题，主要解决包括多径路由网络引起的随机时延、潜在的数据丢失和不均衡网络负载等问题。这些缺陷都需要我们从控制和网络的角度共同考虑，从而可以在资源受限的网络中为控制系统提供有保证的性能，进一步发展通信理论和控制理论之间的联系。全篇的组织结构如下所示：

第一章主要介绍了研究课题的背景和意义，分别从网络化控制的时延和丢包问题，多径路由调度协议和通信与控制协同设计三个角度对国内外的研究和进展进行了一个概述，并简单介绍了本文涉及的相关理论工具。

第二章针对基于多径路由的时间驱动的网络化控制系统体系，研究了一类具有区间有界时变时滞的随机系统的相应问题，同时考虑了在多径路由中丢包和时延的独特性，将其建立为马尔可夫跳变系统模型，并且根据不同信道中的时延进行针对性的控制器设计。最后通过具体通信信道的选择以及结合基于包的控制方法，提出了可以最小化时变时延损失的控制器设计方法。

第三章考虑了基于多径路由通信的网络化控制系统的调度策略和控制器的联合设计。通过将多径路由中路径切换所导致的时变时延特性转化为系统模型之间的切换特性，将其描述成具有有限子系统的切换系统模型。该模型简化了当前问题，通过定义一个代价函数描述网络资源和控制性能之间的权衡，并通过对代价函数

最优解的搜索找到联合优化设计方案。

最后一章对全文内容进行总结，并且对本课题的未来研究的方向提出了几点展望。

## 第二章 多径路由网络化控制系统的建模和稳定性分析

在网络化控制系统中，网络诱导时延和数据包丢失是网络控制系统中两个主要的问题，时延和丢包会导致系统的性能下降，甚至导致系统不稳定。本章针对基于多径路由的时间驱动网络化控制系统体系，研究了一类具有区间有界时变时滞的随机系统的相应问题，同时考虑了在多径路由中丢包和时延的独特性，建立了一个马尔可夫跳变时延模型，将时延和丢包统一建立成关于执行器端时延的模型。将该模型与闭环性能分析模型相结合，结合基于包的控制方法，给出了控制器设计方法。

### 2.1 多径路由网络化控制系统时延建模

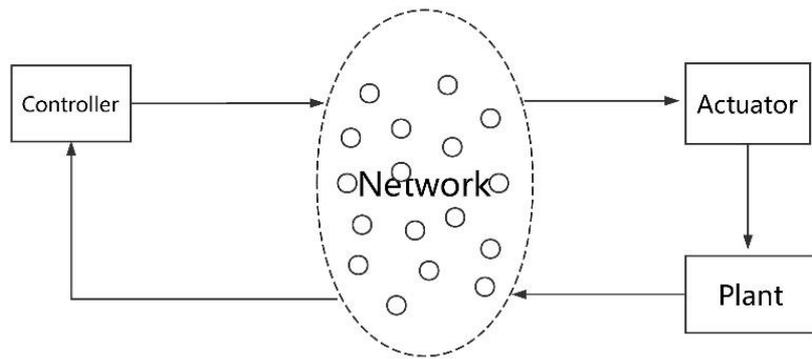


图2-1 基于多径路由的网络化控制系统结构图

Figure 2-1. Structure Diagram of Networked Control System Based on Multi-path Routing

本章研究的网络化控制系统结构如图 2-1 所示，假设在通信网络中分别存在着从传感器到控制器的时延和从控制器到执行器的时延，并且假设每条路径中存在丢包情况，且路径的连续丢包上界为 1，丢包率用  $P$  表示。传感器在发送数据时，会在数据包中加入时间戳，执行器端收到控制信息时，通过比较数据包的时间戳可以获得当前数据包的时延信息，从而可以判断当前数据包的新旧情况。网络化控制系统中传感器到控制器的通信路径和控制器到执行器的通信路径可以直接看作是从传感器到执行器的路径，针对不同的路径，执行器端根据节点数量设置不同的缓冲区，将不同路径中的时变时延转化为固定时延，其时延用  $\tau_i$  表示。下面分析多径路由网络的通信时延和丢包的建模，并在执行器每次采用最新的控制信

息的情况下，执行器端时延的分布情况。

### 2.1.1 多径路由网络时延与丢包模型的建立

在本文的网络化控制系统中，控制信息通过多条路径进行信息的交换和传输，因此需要考虑任务在多条路径中如何分配才能保证较好的网络性能<sup>[85,86]</sup>。对多径路由进行合理的路由分组选择可以有效降低网络拥塞。由于单条路径经过的节点具有相似性，假设每个节点拥有相同的发射功率和传输范围，当两个节点处于对方的传输范围时，两个节点之间会产生相互干扰，即信道竞争<sup>[87]</sup>。另外在多径路由网络中，节点往往分布于较大的物理空间，用于进行一些复杂或者危险的任务。但是这些节点基本上通过电池供电，并且更换电池殊为不易，其能量相当有限。在路由发现过程中，为了防止出现部分节点能耗提前耗尽所带来的影响，将节点剩余能量纳入路径的选择参数中也是十分必要的<sup>[88]</sup>，下面将从节点竞争以及节点能量两个角度进行路径调度方案的设计。

假设路径*i*的剩余能量和能耗的描述函数分别用 $F_1^i$ 和 $F_2^i$ 表示，下面给出本章定义的节点代价函数。

$$F_1^i = \frac{\sum_{t=1}^{n_i} 1/p_i^t}{n_i} \max\{1/p_i^t\} \quad (2-1)$$

$$F_2^i = n_i f \quad (2-2)$$

$n_i$ 表示路径*i*中节点数量， $p_i^t$ 表示路径*i*中节点*t*的剩余能量值， $f$ 表示两个节点之间进行通信的能量消耗。前者分别考虑了低能量路径以及低能量节点，后者为使用路径进行通信所消耗的能量。为了权衡两者的比重，需要引入一个平滑参数 $\lambda^*$ ， $\lambda^*$ 越大，此性能指标对负载均衡的偏重即越大，具体取值可以根据实际需要进行设置。

$$F^i = \lambda^* F_1^i + (1 - \lambda^*) F_2^i \quad (2-3)$$

由于路径代价值与节点剩余能量成反比，和通信能耗成正比，当路径中节点的剩余能量值越低或者路径通信能耗越高，都会造成使用该路径时通信网络付出更高的代价，因此该公式可以将通信能耗在各个节点之间进行均衡，保护低能量节点以及低能量路径，从而保证了整个网络的负载平衡，延长了网络的寿命<sup>[89]</sup>。因此可以根据上述代价函数给出路径的初始选择概率。

$$P_0^i = \frac{F^i}{\sum_{i=1}^m F^i} \quad (2-4)$$

其中*m*为路径数。

当确定路径的初始选择概率时，下面分析路径的单径冲突。如图 2-2 所示，由于节点载波侦听范围较大，即使是同一路径的前后两个数据包之间也会可能形成冲突竞争，导致时延变大。因此，为了避免单径冲突以及充分利用多径路由的优点，每次选择路径时避免连续使用同一路径。因此选择过程中路径的选择概率为：

$$P(R_{k+1} = i | R_k = j) = \begin{cases} \frac{F^i}{\sum_{i=1}^m F^i - F^j} & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (2-5)$$

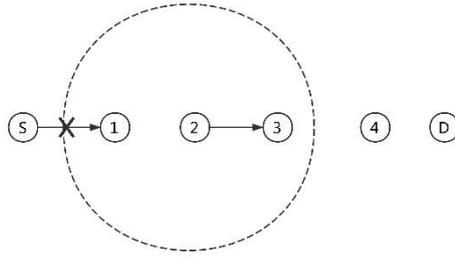


图2-2 同一路径的单径冲突

Figure 2-2. Single path conflict of the same path

通过上式即可以得到关于时延的 Markov 跳变函数

$$\begin{aligned}
 P(\tau(k+1) = i | \tau(k) = j) &= P_0^{m_1(\tau_m=j)} (P(n_1(\tau_n = i) | m_1) \\
 &+ P(n_2(\tau_n = i) | m_1) + \dots) + P_0^{m_2(\tau_m=j)} (P(n_1(\tau_n = i) | m_2) \\
 &+ \dots P(n_2(\tau_n = i) | m_2) + \dots) + \dots
 \end{aligned} \quad (2-6)$$

其中  $m_i(\tau_m = j)$ ,  $n_i(\tau_n = i)$  表示满足  $\tau_m = j$ ,  $\tau_n = i$  的所有路径。

**引理 2.1** 当具有初始选择概率的多信道网络避免连续使用同一信道时，其网络诱导时延满足有限状态的 Markov 链。

假设有  $n+1$  条路径，路径的时延  $\tau \in \{0, 1, 2, \dots, n\}$ ，可以得到时延的状态转移概率矩阵，其中  $P(\tau(k+1) = i | \tau(k) = j)$  用  $p_{ji}$  表示。

$$\pi_\tau = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} & \dots & p_{0n} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ p_{n0} & p_{n1} & \dots & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

### 2.1.2 执行器端时延模型的建立

上一节中，通过对路由协议的分析建模，将时延建立一个服从有限状态的 Markov 链的形式。由于在多径通信网络中，每次选择不同的路径会带来不同的时延，并且时延可能会大于一个采样周期时，在一个周期内可能会有多个控制信息到达执行器一端，即控制信息并不满足先入先出的原则，因此数据包的乱序是一个很大的问题。Liu 在文章中证明了路径中的 Markov 时延在执行端同样满足 Markov 特性，但其并没有考虑当丢包存在时的情况<sup>[47]</sup>。本文在多径路由的前提下，对路径中同时存在时延和丢包的情况进行了进一步分析。

由于路径中同时存在时延和丢包两种网络状态，用  $N(k) = (a, b)$  来描述  $k$  时刻的网络情况，当  $a = 0$  时表示链路发生丢包， $a = 1$  时表示路径成功传输控制信息， $b$  表示  $k$  时刻传感器采用了时延为  $b$  的通信信道。例如  $(1, 2)$  表示这一时刻传感器采用了时延为 2 的链路，且这条链路没有发生丢包。当信道关于各个路径的丢包率已知时，根据上文分析的时延的状态转移概率矩阵可以得到网络状态的转移概率矩

阵。

令  $P(N(k) = (m, n) | N(k-1) = (a, b)) = P_{(a,b)(m,n)}$ , 多径路由的网络状态的状态转移概率矩阵如下所示:

$$\pi_N = \begin{bmatrix} p_{(0,0)(0,0)} & p_{(0,0)(1,0)} & \cdots & \cdots & p_{(0,0)(1,n)} \\ p_{(1,0)(0,0)} & p_{(1,0)(1,0)} & \cdots & \cdots & p_{(1,0)(1,n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ p_{(1,n)(0,0)} & p_{(1,n)(1,0)} & \cdots & \cdots & p_{(1,n)(1,n)} \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

当网络中存在时延和丢包时, 且执行器每次都采用最新的控制信息, 执行器端的时延上限为信道的时延上限和连续丢包上界之和。在这里执行器端的时延满足  $\tau^* \in \{1, 2, \dots, d\}, d = n + 1$ 。因此执行器端的时延和前  $d$  个时刻的网络状态有关。

**定理 2.1** 令  $\theta_k = [N_k, N_{k-1}, N_{k-2}, \dots, N_{k-d}]$ , 表示路由信道前  $d$  时刻的情况, 执行器的时延  $\tau_k^*$  与  $\theta_k$  有关。

$$\begin{aligned} p_{ab} &= \text{prob}\{\tau_{k+1}^* = b | \tau_k^* = a\} \\ &= \frac{\sum_{\{j, \dots, j-d, i, \dots, i-d\} \in D_2} P_{ij} \delta_{ij-1} \dots P_{i-d+1, j-d+1} \delta_{i-d+1, j-d}}{\sum_{\{i, i-1, \dots, i-d+1\} \in D_1} P_{i-1, j} \dots P_{i-d+1, i-d+2}} \end{aligned} \quad (2-9)$$

其中  $D_1$  表示当满足  $\tau_k^* = a$  时,  $k-d+1$  时刻到  $k$  时刻网络状态的可行值,  $D_2$  表示当满足  $\tau_k^* = a, \tau_{k+1}^* = b, k-d+1$  时刻到  $k+1$  时刻网络状态的可行值,  $\delta_{ij}$  表示 Kronecker delta, 即克罗内克函数。

**证明.**

$$\begin{aligned} p_{ab} &= \text{prob}\{\tau_{k+1}^* = b | \tau_k^* = a\} \\ &= \text{prob}\{\theta(k+1) = s | \theta(k) = r\} \\ &= \text{prob}\{N_{k+1} = j, N_k = j-1, \dots, N_{k-d+1} = i-d+1 | N_k = i, N_{k-1} = \\ &\quad i-1, \dots, N_{k-d+2} = i-d+1\} \\ &= \frac{\sum_{\{j, \dots, j-d, i, \dots, i-d\} \in D_2} P_{ij} \delta_{ij-1} \dots P_{i-d+1, j-d+1} \delta_{i-d+1, j-d}}{\sum_{\{i, i-1, \dots, i-d+1\} \in D_1} P_{i-1, j} \dots P_{i-d+1, i-d+2}} \end{aligned} \quad (2-10)$$

证明完毕。

在这里用一个例子对证明过程进行更直观的表达。假设有两条路由路径, 时延分别为 0, 1, 链路的连续丢包上界为 1。  $\tau_k^* = 2, \tau_{k+1}^* = 0$ ,  $\theta_k$  和  $\theta_{k+1}$  的状态值如下:

$$\begin{aligned} D_1 &= \{(i_{-1} = (0, 1), i = (1, 1)), (i_{-1} = (0, 0), i = (1, 1))\} \\ D_2 &= \{(j_{-2} = (0, 1), j_{-1} = (1, 1), j = (1, 0)), (j_{-2} = (0, 0), \\ &\quad j_{-1} = (1, 1), j = (1, 0))\} \end{aligned}$$

可以得到

$$\begin{aligned} p_{20} &= \frac{\sum_{\{j, \dots, -2, i, \dots, i-1\} \in D_2} P_{ij} \delta_{ij-1} P_{i-1, j-1} \delta_{i-1, j-2}}{\sum_{\{i, i-1\} \in D_1} P_{i-1, j}} \\ &= \frac{P_{(0,1)(1,1)} P_{(1,1)(1,0)} + P_{(0,0)(1,1)} P_{(1,1)(1,0)}}{P_{(0,1)(1,1)} + P_{(0,0)(1,1)}} \\ &= \frac{P_{(0,0)(1,1)} P_{(1,1)(1,0)}}{P_{(0,0)(1,1)}} \end{aligned}$$

$$= P_{(1,1)(1,0)}$$

同理可以得到  $p_{21} = P_{(1,1)(0,0)}$ ,  $p_{22} = 0$ ,  $p_{21} + p_{20} + p_{22} = 1$ 。

通过以上的分析，将多径路由信道中的时延和丢包建立成关于执行器端的 Markov 时延模型。

$$\pi_{\tau^*} = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} & \cdots & p_{0(n+1)} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1(n+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ p_{(n+1)0} & p_{(n+1)1} & \cdots & \cdots & p_{n(n+1)} \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

## 2.2 系统的稳定性分析和控制器设计

### 2.2.1 闭环系统的模型

考虑以下受控对象，

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (2-12)$$

其中  $x(k)$ ,  $u(k)$ ,  $y(k)$  分别表示控制系统的系统状态，控制输入和被控输出。 $A$  和  $B$  分别是控制系统中的定常矩阵。

当在  $k$  时刻计算控制增益时，需要针对不同的情况设计反馈控制增益。

$$u(k) = K(\tau_k^*)x(k - \tau_k^*)$$

因此网络化控制系统转化为下式

$$x(k+1) = Ax(k) + BK(\tau_k^*)x(k - \tau_k^*) \quad (2-13)$$

令  $X(k+1) = [x(k)^T \ x(k-1)^T \ x(k-2)^T \ \cdots \ x(k-d)^T]^T$ ，网络控制系统状态空间方程可以转化为

$$X(k+1) = (A^* + B^*K(\tau_k^*)C(\tau_k^*))X(k) \quad (2-14)$$

$$A^* = \begin{bmatrix} A & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ I & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & I & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & I & 0 \end{bmatrix} \quad B^* = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C(\tau_k^*) = [0 \ \cdots \ I \ \cdots \ 0] \quad (2-15)$$

由于时延的不确定性，时延  $\tau_k^*$  只有当控制信息到达执行器时，执行器通过查看控制信息的时间戳得到具体的时延，而在控制器一端无法及时得到时延信息，因此对于控制器执行器端具体的时延信息是一个未知量。在大多数文献中，通常只采用固定的反馈增益  $K$ ，即  $u(k) = KX(k - \tau_k^*)$ 。这种方法有较大的保守性。在这里采用基于包的控制<sup>[90]</sup>。在控制器端，会发送一个包含应对各种不同时延情况的控制信息的数据包，如下所示

$$U(k) = [K(1)x(k - \tau_k^*) \ \cdots \ K(d)x(k - \tau_k^*)] \quad (2-16)$$

当  $U(k)$  到达执行器时，执行器一端通过比较前一时刻的使用的控制信息和这

一时刻发送到达的控制信息的时间戳，得到这一时刻的时延情况，基于这个时延信息对包中的控制信息进行选择，将合适的控制量发送到受控对象。

### 2.2.2 控制器设计

**定义 2.1** 系统是随机稳定的，如果对于任意初始模态 $\{\tau_0^*\}$ ，有

$$\sum_{k=0}^{\infty} E[\|x(k)\|^2 | \tau_0^*] < x(0)^T N(\tau_0^*) x(0)$$

成立。

**定理 2.2** 对于系统(2-12)，如果存在对称正定矩阵 $P_0, P_1, \dots, P_d$ 满足：

$$\sum_{j=0}^d p_{ij} \mathcal{E}(j)^T P(j) \mathcal{E}(j) < P(i) \quad i \in \{0, 1, \dots, d\} \quad (2-17)$$

其中 $(A^* + B^* K(i) C) = \mathcal{E}(i)$ ，则系统随机稳定。

**证明.** 首先对于闭环系统(2-12)，建立一个李雅普诺夫函数

$$V(X(k), \tau_k^* = i) = X(k)^T P(i) X(k) \quad (2-18)$$

可以有以下推论，

$$\begin{aligned} E\{\Delta V(X(k), k)\} &= E\{V(X(k+1) | \tau_k^* = i)\} - V(X(k), k) \\ &= X(k)^T \left[ \sum_{j=0}^d p_{ij} \mathcal{E}(j)^T P(j) \mathcal{E}(j) - P(i) \right] X(k) \end{aligned}$$

已知 $\sum_{j=0}^d p_{ij} \mathcal{E}(j)^T P(j) \mathcal{E}(j) < P(i)$ 成立，可以得到

$$\begin{aligned} E\{\Delta V(X(k), k)\} &\leq -\lambda_{\min}(-\Phi(i)) X(k)^T X(k) \\ &\leq -\beta \|X(k)\|^2 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \beta &= \inf\{\lambda_{\min}(-\Phi(i)); i \in \{0, 1, \dots, d\}\} \\ \Phi(i) &= \sum_{j=0}^d p_{ij} \mathcal{E}(j)^T P(j) \mathcal{E}(j) - P(i) \end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned} E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \|X(k)\|^2\right\} &< (1/\beta) E\{V(X_0, 0)\} \\ &\leq X(0)^T N X(0) \end{aligned}$$

其中 $N = \left(\frac{1}{\beta}\right) \max\{\Phi(i), i \in \{0, 1, \dots, d\}\}$

证明结束。

**引理 2.2** 利用舒尔补，将(2-17)式转化为下式，整个线性矩阵不等式可以转化为：存在对称正定矩阵 $P_0, P_1, \dots, P_d$ 和控制增益 $K_1, K_2, \dots, K_d$ 使式(2-19)成立。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P_j & (A + BK_0 C_0)^T P_0 & \cdots & (A + BK_d C_d)^T P_d \\ * & 1/p_{j0} P_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ * & 0 & \cdots & 1/p_{jd} P_d \end{bmatrix} > 0 \quad (2-19) \\ j \in \{0, 1, \dots, d\} \end{aligned}$$

上式无法使用常规的求解线性矩阵不等式的方法求取反馈增益，在这里采用  $V-K$  迭代的方式求解  $K$ ，具体设计过程如下：

**算法 2.1：** 求解反馈增益  $K$ 。

步骤 1：假设系统中不存在时延时，即

$$P_{\tau 0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

利用 LQR 求解状态反馈增益  $K_0$ 。

步骤 2：将得到的初始反馈增益  $K_0$  代入式(2-19)中求解  $P_0$ 。

步骤 3：将执行器端时延  $P_{\tau 0}$  向  $P_{\tau^*}$  进行摄动，即  $P_{\tau 1} = P_{\tau 0} + \Delta_1$ 。

步骤 4：将  $P_0$  和  $P_{\tau 1}$  代入不等式(2-19)，求解反馈增益  $K_1$ 。

步骤 5：重复 234 步骤，当时延状态转移矩阵摄动到给定的状态转移矩阵  $P_{\tau^*}$  时，可以得到满足不等式的  $K_i$ 。

## 2.3 数值仿真

本节考虑一个数值例子来说明本文提出的方法的有效性。

$$A = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.1000 & -0.0166 & -0.0005 \\ 0 & 1.0000 & -0.3374 & -0.0166 \\ 0 & 0 & 1.0996 & 0.1033 \\ 0 & 0 & 2.0247 & 1.0996 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0.0045 \\ 0.0896 \\ -0.0068 \\ -0.1377 \end{bmatrix}$$

假设多跳节点网络存在两条路径，时延分别为 0,1,信道的时延和丢包的转移概率矩阵如下所示，且丢包和路径有关。

$$\pi_{\tau} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \pi_{drop} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.8 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

通过时延和丢包的状态转移矩阵，可以得到执行器端时延的 Markov 链的状态转移概率矩阵  $\pi_{\tau}^*$ 。

$$\pi_{\tau}^* = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0.58 & 0.18 & 0.24 \\ 0.7 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

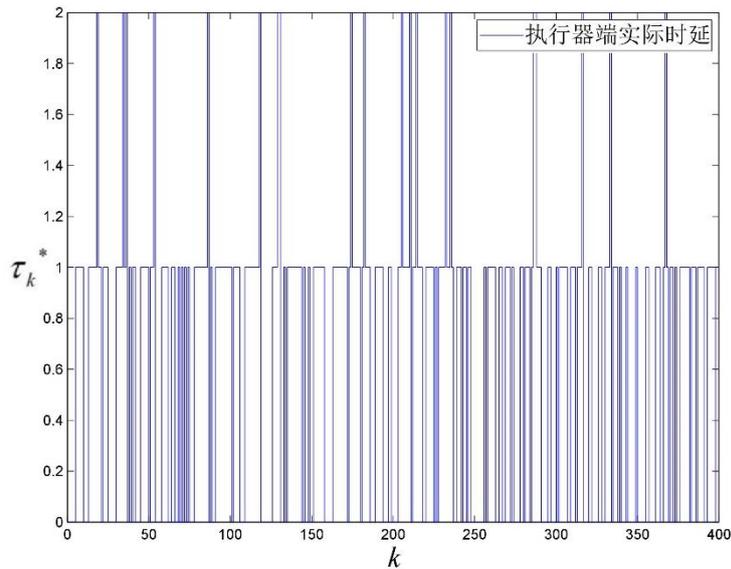


图2-3 执行器端时延情况

Figure 2-3. Actuator-side time-delay

首先考虑当不存在时延时，计算初始反馈控制增益，得到

$$K_{01} = [0.5292 \quad 0.6489 \quad 22.4115 \quad 2.8205]$$

$$K_{02} = [0.3792 \quad 0.8912 \quad 20.2425 \quad 5.3681]$$

$$K_{03} = [0.0499 \quad 0.4266 \quad 15.6574 \quad 5.7322]$$

按照上述求解不等式的  $V - K$  迭代的步骤，可以得到满足上述时延转移概率矩阵的反馈控制增益。

$$K_1 = [1.1144 \quad 2.1054 \quad 27.2467 \quad 5.9104]$$

$$K_2 = [0.2957 \quad 1.1880 \quad 19.6432 \quad 6.0531]$$

$$K_3 = [-0.1299 \quad 0.6199 \quad 12.5301 \quad 5.5800]$$

通过仿真，可以得到基于多径路由网络同时存在时延和丢包时执行器端的时延的分布情况，参见图 2-4。另外，如果没有使用基于执行器端时延的控制策略，即使用文献[45]中的固定反馈增益控制器设计方法，而不考虑不同执行器端时延的情况，在相同的仿真条件下，系统性能比较差，甚至可能造成系统的不稳定，比较证明了所提出的基于执行器端的控制方法的有效性。对于这种时变时延的情况，通常还会采用预测控制的方法进行处理，但由于执行器和控制器的时延乱序问题，这种方法并没有得到较好的预期效果，参见图 2-5，因此综上所述，本文方法具有更好的控制效果。

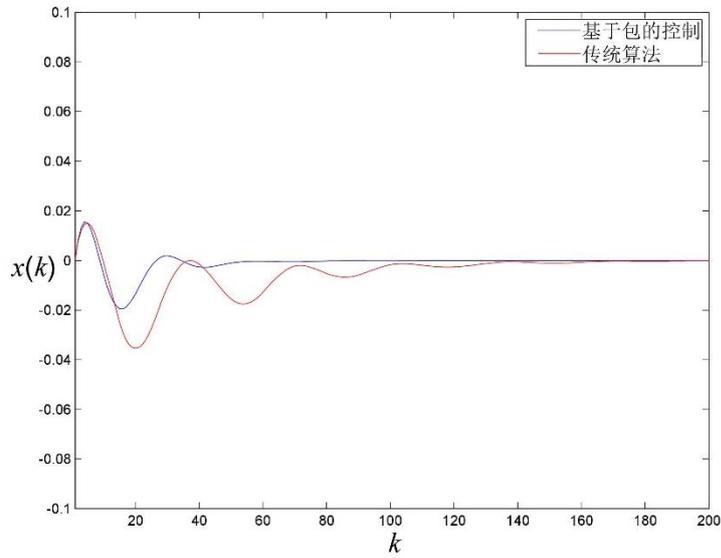


图2-4 基于执行器端时延的方法和传统控制方法的比较(a)

Figure 2-4. Comparisons between actuator side delay and traditional control method(a)

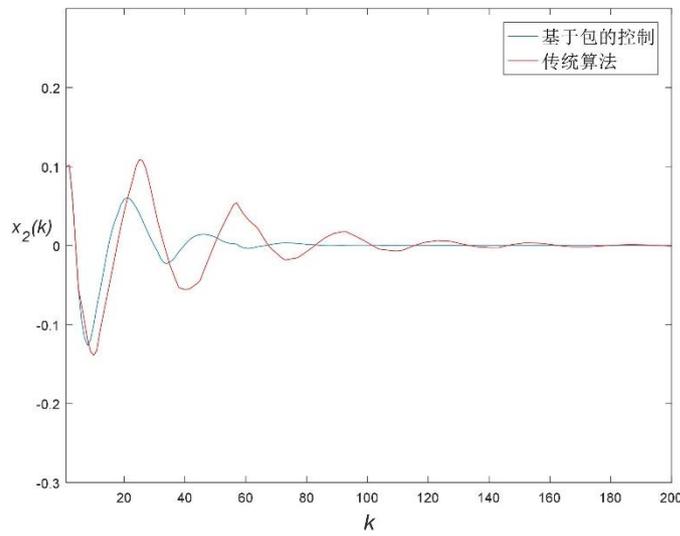


图2-5 基于执行器端时延的方法和传统控制方法的比较(b)

Figure 2-5. Comparisons between actuator side delay and traditional control method(b)

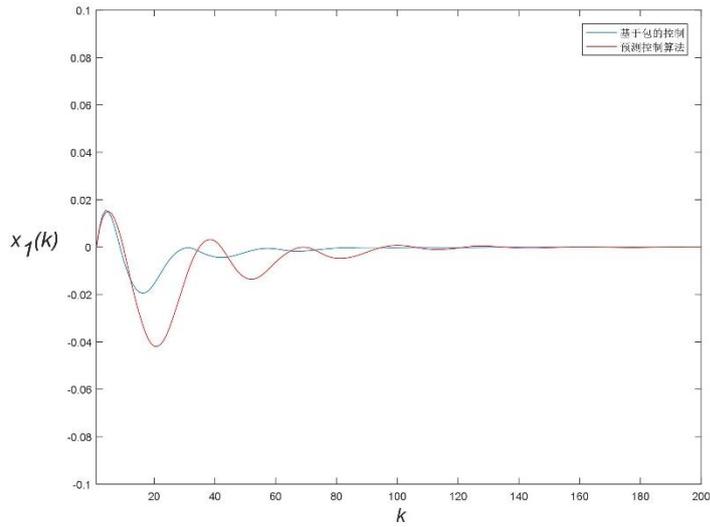


图2-6 基于执行器端时延的方法和预测控制算法的比较(a)

Figure 2-6. Comparison of Actuator-End Delay-Based Method and Predictive Control Algorithms(a)

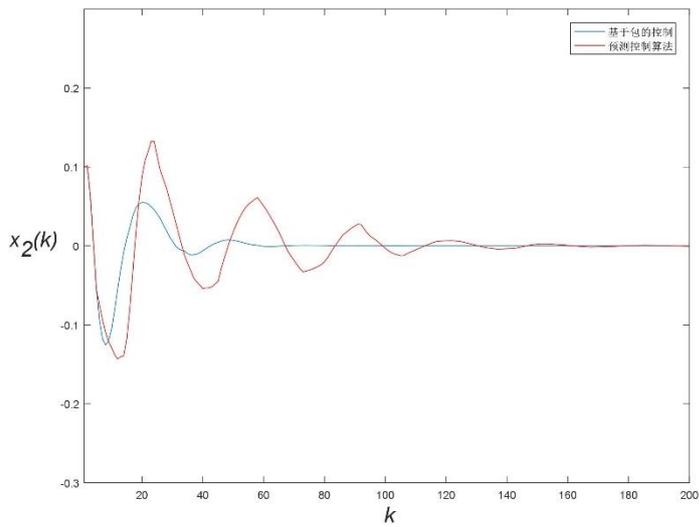


图2-7 基于执行器端时延的方法和预测控制算法的比较(a)

Figure 2-7. Comparison of Actuator-End Delay-Based Method and Predictive Control Algorithms(b)

## 2.4 本章小结

本章针对面向多径路由的网络化控制系统，研究了一类具有区间有界时变时滞的随机系统的相应问题，考虑了基于多径路由网络的前提下，由于网络缺陷而引

起的信道丢包和通信时延的独特性，并从路由协议的角度对通信信道的时延和丢包进行建模，将通信信道的时延和丢包统一建立成执行器端时延的齐次遍历马尔可夫链的形式。之后采用了基于包的控制方法，针对不同的执行器端时延设计控制器。未来进一步的研究方向主要会集中在路由协议和控制设计更加紧密的协同设计上，研究更普适的调度和控制协同设计方法。

### 第三章 多径路由网络化控制系统的路径调度与控制器协同设计

上一章介绍了在多径通信网络化控制系统中，如何根据不同的信道采用不同的控制信号，实现系统的稳定性，但这一方法并没有从有利于网络的角度进行考虑和设计。在本章中，通过将多径路由中路径切换所导致的时变时延特性转化为系统模型之间的切换特性，可以将其描述成具有有限子系统的切换系统模型，为了提高网络的使用率，特别将系统开环的情况也作为一种子系统加入系统分析之中，最后依据能量路由的思想求解具体的路径调度方案以及反馈增益，实现了控制和通信的协同设计。

#### 3.1 问题描述

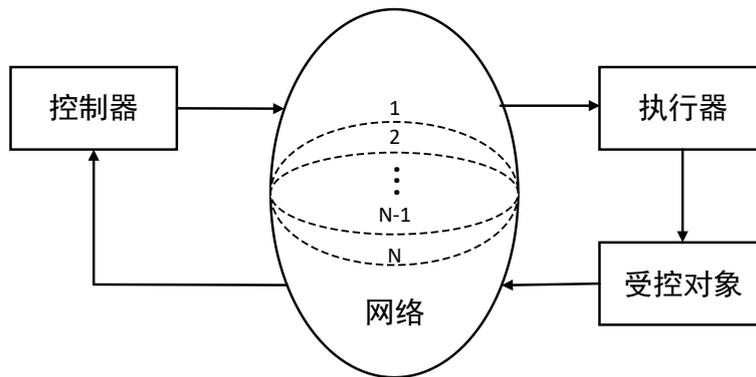


图3-1 多径路由网络化控制系统结构图

Figure 3-1. Structural diagram of multipath routing networked control system

考虑如图 3-1 所示的多径路由网络化控制系统。从传感器到控制器和从控制器到执行器分别存在  $N_1$  和  $N_2$  条可选路径，每条可选路径都可能包含多个中继节点<sup>[91]</sup>。传感器选择  $N_1$  条路径中的一条将采样数据和所选择的路径信息打包发送到控制器，控制器同样选择一条路径将控制信息发送到执行器。即在受控对象的采样信息从传感器出发经由控制器，控制器再将对应控制信息发送到执行器的过程中存在  $N = N_1 N_2$  条闭环通信路径。假设时延主要依赖于闭环通信路径所经过中继节点的数量，并将其近似设为固定的，记第  $i$  条闭环通信路径为  $P_i$ ，并记其时延为  $\tau_i$ ， $\tau_i \in \mathbb{Z}$ ，则  $0 \leq \tau_i \leq d$ ， $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ，其中  $d = \max\{\tau_i\}$ ，即时延上限。

### 3.1.1 闭环路径调度方案制器设计

当系统每次采用某条闭环通信路径传输数据时，通信网络都需要付出相应的代价，在本文中，通信网络的代价值主要受闭环通信路径的通信能耗以及路径中节点的剩余能量所影响。例如，当某条闭环通信路径具有更多节点时，使用该路径即会消耗更多能量。另外，若某块区域节点能量提前耗尽，整个网络将分割成互不相连的孤立部分，因此在使用某条具有更低剩余能量节点的闭环路径时，对通信网络将造成更加不利的影晌。Shah 根据上述思想提出了一种能量路由的算法，该算法通过通信能耗和节点剩余能量计算使用每条闭环通信路径的代价值<sup>[92]</sup>。

对闭环通信路径的使用方式，本文采用一种周期性调度方案，不失一般性的将数据的单次传输（对应于某条路径的使用）视为基准单位，调度周期定义为所有的通信路径在此期间内的使用次数之和，记为 $T$ 。路径的调度仅在某给定的有限周期 $T$ 内考虑，但允许调度方案的在线调整。从原理上讲，这种调度方案类似于模型预测控制方法，可利用有限时域的滚动优化在降低设计复杂性的同时有效提高系统对抗不确定性的能力。

给定周期 $T$ ，本文的周期性调度方案需设计在此周期 $N$ 条闭环通信路径的使用顺序和相应的连续使用次数，其中在周期内每条闭环通信路径最多使用一次（否则归为下一个周期调度）。闭环路径在第 $i$ 个周期的调度方案可如下表示：

$$\zeta_T^i: \{P_{i1}, \alpha_{i1}\}, \{P_{i2}, \alpha_{i2}\}, \dots, \{P_{iN}, \alpha_{iN}\}$$

其中  $P_{ij}$  表示第 $i$ 个周期内第 $j$ 次选择的闭环通信路径，则闭环路径的选择序列  $\{i_1, i_2, \dots, i_N\}$  是  $\{1, 2, \dots, N\}$  的一个排列； $\alpha_{ij}$  是周期内路径  $P_{ij}$  的连续使用次数，则按照 $T$ 的定义有  $\sum_{j=1}^N \alpha_{ij} = T$ 。其中当  $\alpha_{ij} = 0$  时，表示此周期并未采用路径  $P_{ij}$ 。记  $\Omega$  为所有可能闭环通信路径调度方案  $\zeta_T^i$  的集合。

在受控对象的每个采样时刻，传感器都将选择一条闭环通信路径进行数据传输。记闭环通信路径  $P_{ij}$  在第 $i$ 个周期内的代价值为  $F_{ij}$ ，并假设其在周期内不变，则通信网络在第 $i$ 个周期内的平均代价值可定义为

$$F^i(T) = 1/T \sum_{j=1}^N \alpha_{ij} F_{ij} \quad (3-1)$$

### 3.1.2 网络化控制系统建模

受控对象的模型表达如下

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (3-2)$$

$x(k) \in \mathbb{R}^n$ ， $u(k) \in \mathbb{R}^m$  分别表示系统状态以及控制输入， $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  和  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$  为定常矩阵。

本文采用状态反馈控制，由于控制器可以分别得到传感器到控制器以及控制器到执行器所采用的路径信息，因此在提前知道当前所采用闭环通信路径及时延

的前提下，控制器可以根据不同的时延选择不同的反馈增益对时延进行补偿

$$u(k) = K(\tau_i)x(k - \tau_i) \quad (3-3)$$

其中反馈增益 $K(\tau_i) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  显式依赖于 $k$ 时刻所采用闭环通信路径 $\mathcal{P}_i$ 的时延 $\tau_i$ 。不失一般性，约定 $x(-1), \dots, x(-d)$ 为0。

根据式(3-3)，式(3-2)可以转化为

$$x(k+1) = Ax(k) + BK(\tau_i)x(k - \tau_i) \quad (3-4)$$

令 $X(k+1) = [x(k)^T \ x(k-1)^T \ x(k-2)^T \ x(k-d+1)^T]^T$ ，网络化控制系统的状态空间方程可以转化为

$$X(k+1) = (A^* + B^*K(\tau_i)C(\tau_i))X(k) \quad (3-5)$$

$$A^* = \begin{bmatrix} A & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ I & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & I & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & I & 0 \end{bmatrix} \quad B^* = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C(\tau_i) = [0 \ \cdots \ 0 \ I \ \cdots \ 0]$$

$\tau_i$

令 $(A^* + B^*K(\tau_i)C(\tau_i)) = \Phi_i$ ，其闭环特性可以表示为

$$X(k+1) = \Phi_i X(k) \quad (3-6)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, N$ 。

**问题** 对每个闭环通信路径的选择周期 $i$ ，选择闭环通信路径调度方案 $\zeta_T^i$ ，使得在保证系统(3-6)稳定的前提下，最小化周期内平均代价值式(3-1)。即

$$\min_{\zeta_T^i \in \Omega} F^i(T) \quad (3-7)$$

s.t 系统(3-6)稳定

由于短时延路径往往被频繁使用，导致其剩余能量不高，即具有较大的代价值，所以此问题具有研究的价值。

## 3.2 稳定性分析

首先对系统(3-6)的指数稳定性进行分析，得到当系统稳定时多径路由需要满足的条件，并给出符合稳定条件的闭环通信路径调度方案。

### 3.2.1 系统的指数稳定性分析

在进行系统稳定性分析之前，首先给出指数稳定以及切换系统平均驻留时间的定义。

**定义 3.1** 考虑一个系统，若存在正常数 $c$ 和 $0 < \lambda < 1$ ，使得对于任意的初始状态 $x(0)$ ，满足 $\|x(k)\| \leq c\lambda^k \|x(0)\|$ 则系统是指数稳定的并具有指数衰减率 $\lambda$ 。

**定义 3.2** 假设间隔 $[0, k]$ 内切换系统的切换次数为 $N_k$ ，若 $N_k$ 满足

$$N_k \leq N_0 + \frac{k}{t_a}$$

$t_a > 0$ 即为切换系统的平均驻留时间，其中 $N_0 \geq 0$ 为抖动界。

引理 3.1 令 $N_k$ 表示系统(3-6)在间隔 $[0, k]$ 内的切换次数， $t_a$ 表示系统的平均驻留时间，并记 $\beta_i(k)$ 为闭环路径 $\mathcal{P}_i$ 在传感器端 $[0, k]$ 内被使用的总次数。当系统(3-6)同时满足以下三个条件时，系统是指数稳定的，并且具有指数衰减率 $\lambda\mu^{1/2t_a}$ 。

(1)存在正定矩阵 $P_j, K_j$ ，常数 $\mu \geq 1, \lambda_j \geq 0$ ，满足下列不等式，其中 $i, j = 1, 2, \dots, N$ 。

$$-\lambda_j^2 P_j + \Phi_j^T P_j \Phi_j \leq 0 \quad (3-8)$$

$$P_i \leq \mu P_j \quad (3-9)$$

(2)存在 $\lambda \leq 1$ 以及闭环通信路径使用次数 $\beta_i(k)$ 满足

$$\sum_{i=1}^N \beta_i(k) \ln \lambda_i \leq k \ln \lambda \quad (3-10)$$

(3)平均驻留时间满足以下不等式

$$N_k \leq N_0 + k/t_a \quad t_a > t_a^* = \frac{\ln \mu}{2 \ln(\frac{1}{\lambda})} \quad (3-11)$$

证明. 假设系统(3-6)在 $k$ 时刻使用闭环通信路径 $\mathcal{P}_j$ ，其闭环系统为

$$X(k+1) = \Phi_j X(k) \quad (3-12)$$

选取合适的李雅普诺夫函数

$$V_j(k) = X(k)^T P_j X(k) \quad (3-13)$$

$j \in \{1, 2, \dots, N\}$ ，若系统(3-6)在 $k-1$ 时刻使用的闭环通信路径也为 $\mathcal{P}_j$ 时，即系统未发生切换，

$$\begin{aligned} V_j(k) &= X(k)^T P_j X(k) \\ &= [\Phi_j X(k-1)]^T P_j [\Phi_j X(k-1)] \\ &= X(k-1)^T \Phi_j^T P_j \Phi_j X(k-1) \\ &\leq \lambda_j^2 X(k-1)^T P_j X(k-1) \\ &= \lambda_j^2 V_j(k-1) \end{aligned} \quad (3-14)$$

若系统(3-6)在 $k-1$ 时刻使用的路径为 $\mathcal{P}_i$ 时，其中 $i \neq j$ 。

$$\begin{aligned} V_j(k) &= X(k)^T P_j X(k) \\ &= [\Phi_i X(k-1)]^T P_j [\Phi_i X(k-1)] \\ &= X(k-1)^T \Phi_i^T P_j \Phi_i X(k-1) \\ &\leq \mu \lambda_i^2 X(k-1)^T P_i X(k-1) \\ &= \mu \lambda_i^2 V_i(k-1) \end{aligned} \quad (3-15)$$

不失一般性，假设系统(3-6)在间隔 $[0, k]$ 的切换点分别为 $l_1, l_2, \dots, l_{N_k}$ ，并且对应使用的闭环通信路径为 $\mathcal{P}_{j-N_k}, \mathcal{P}_{j-N_k+1}, \mathcal{P}_{j-N_k+2}, \dots, \mathcal{P}_j$ ，其中路径 $\mathcal{P}_i$ 的总使用次数为 $\beta_i(k), i = 1, 2, \dots, N$ ， $k$ 时刻系统(3-6)的李雅普诺夫函数满足

$$V_j(k) = X(k)^T P_j X(k)$$

$$\begin{aligned}
 &\leq \lambda_j^{2(k-l_{N_k})} V_j(l_{N_k}) \\
 &\leq \mu \lambda_j^{2(k-l_{N_k})} \lambda_{j-1}^{2(l_{N_k}-l_{N_k-1})} V_{j-1}(l_{N_k-1}) \\
 &\quad \vdots \\
 &\leq \mu^{N_k} \prod_{j=1}^N \lambda^{2\beta_j} V_{j-N_k}(0)
 \end{aligned} \tag{3-16}$$

由式(3-10)可知

$$\prod_{j=1}^N \lambda^{\alpha_j} \leq \lambda^k \tag{3-17}$$

结合式(3-11)

$$\begin{aligned}
 V_j(k) &\leq \mu^{N_k} \prod_{j=1}^N \lambda^{2\beta_j} V_{j-N_k}(0) \\
 &\leq \mu^{N_k} \lambda^{2k} V_{j-N_k}(0) \\
 &\leq \mu^{N_0} \left( \mu^{\frac{1}{2ta}\lambda} \right)^{2k} V_{j-N_k}(0)
 \end{aligned} \tag{3-18}$$

根据式(3-13)可知:

$$V_j(k) \geq \min_{\{i=1,2,\dots,N\}} \{\lambda_{\min}(P_i)\} \|X(k)\|^2 \tag{3-19}$$

$$V_{j-N_k}(0) \leq \max_{\{i=1,2,\dots,N\}} \{\lambda_{\max}(P_i)\} \|X(0)\|^2 \tag{3-20}$$

即

$$\|X(k)\|^2 \leq \frac{\max_{\{i=1,2,\dots,N\}} \{\lambda_{\max}(P_i)\}}{\min_{\{i=1,2,\dots,N\}} \{\lambda_{\min}(P_i)\}} \mu^{N_0} \left( \mu^{\frac{1}{2ta}\lambda} \right)^{2k} \|X(0)\|^2 \tag{3-21}$$

$$\|X(k)\| \leq \sqrt{\frac{\max_{\{i=1,2,\dots,N\}} \{\lambda_{\max}(P_i)\}}{\min_{\{i=1,2,\dots,N\}} \{\lambda_{\min}(P_i)\}}} \mu^{N_0} \left( \mu^{\frac{1}{2ta}\lambda} \right)^k \|X(0)\| \tag{3-22}$$

根据定义 3.1, 系统(3-6)满足指数稳定, 且具有  $\mu^{\frac{1}{2ta}\lambda}$  的指数衰减率, 证明完毕。

### 3.2.2 调度方案设计

经过 3.2.1 节的分析, 我们可以得到当系统 (3-6) 指数稳定时闭环通信路径总使用次数以及切换系统的平均驻留时间所需要满足的条件。

通过锥补线性化算法(CCL)求解式(3-8)以及式(3-9), 可以分别得到  $N$  条闭环通信路径的最小衰减率  $\lambda_j$  以及对应的控制增益  $K_j, j = 1, 2, \dots, N$ , 求解过程参考定理 3.1。考虑式(3-10)中的  $\lambda$ , 定义满足  $\lambda_j < \lambda$  的路径为低衰减率子系统路径, 反之则为高衰减率子系统路径。

**定理 3.1** 假设路径  $\mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2, \dots, \mathcal{P}_{\bar{n}}$  为高衰减率子系统路径, 路径  $\mathcal{P}_{\bar{n}+1}, \mathcal{P}_{\bar{n}+2}, \dots, \mathcal{P}_N$  为低衰减率子系统路径, 设计方案  $\zeta_T^i$  中  $N$  条闭环通信路径的使用顺序:  $\mathcal{P}_{i_1}, \mathcal{P}_{i_2}, \dots, \mathcal{P}_{i_{N-\bar{n}}} \in \{\mathcal{P}_{\bar{n}+1}, \mathcal{P}_{\bar{n}+2}, \dots, \mathcal{P}_N\}, \mathcal{P}_{i_{N-\bar{n}+1}}, \mathcal{P}_{i_{N-\bar{n}+2}}, \dots, \mathcal{P}_{i_N} \in \{\mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2, \dots, \mathcal{P}_{\bar{n}}\}$  即低衰

减率子系统路径在前, 高衰减率子系统路径在后, 系统遵循此序列周期使用闭环通信路径。当 $\alpha_{i_j}$ 满足下式

$$\sum_{j=1}^N \alpha_{i_j} \ln \lambda_{i_j} \leq \sum_{j=1}^N \alpha_{i_j} \ln \lambda \quad (3-23)$$

并且系统衰减率满足 $\lambda < \mu^{-\frac{1}{2}}$ , 式(3-10)和式(3-11)成立。

**证明.** 对于任意 $k$ , 令 $k = sT + v$ , 其中 $s \geq 0, 0 \leq v < T$ , 即时刻 $k$ 在第 $s + 1$ 个周期内。

不失一般性, 假设

$$\sum_{j=1}^{t-1} \alpha_{(s+1)_j} \leq v \leq \sum_{j=1}^t \alpha_{s+1} \quad (3-24)$$

其中 $t \in \{2, 3, \dots, N\}$ 。

切换次数 $N_k \leq Ns + t$ , 考虑式(3-10)

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \beta_j(k) \ln \lambda_j - k \ln \lambda \\ &= \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^N \alpha_{k_j} \ln \lambda_{k_j} + \sum_{j=1}^{t-1} \alpha_{s+1_j} \ln \lambda_{(s+1)_j} + (v - \\ & \sum_{j=1}^{t-1} \alpha_{(s+1)_j}) \ln \lambda_{(s+1)_t} - \left( \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^N \alpha_{k_j} + v \right) \ln \lambda \\ &= \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^N \alpha_{k_j} \ln \lambda_{k_j} + \sum_{j=1}^{t-1} \alpha_{(s+1)_j} \ln \lambda_{(s+1)_j} + \\ & \quad \left( v - \sum_{j=1}^{t-1} \alpha_{(s+1)_j} \right) \ln \lambda_{(s+1)_t} - \\ & \quad \left( \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^N \alpha_{k_j} + v - \sum_{j=1}^{t-1} \alpha_{(s+1)_j} + \sum_{j=1}^{t-1} \alpha_{(s+1)_j} \right) \ln \lambda \\ &= \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^N \left( \alpha_{k_j} \ln \lambda_{k_j} - \alpha_{k_j} \ln \lambda \right) + \sum_{j=1}^{t-1} \alpha_{(s+1)_j} \left( \ln \lambda_{(s+1)_j} - \ln \lambda \right) \\ & \quad + \left( v - \sum_{j=1}^{t-1} \alpha_{(s+1)_j} \right) \left( \ln \lambda_{(s+1)_t} - \ln \lambda \right) \end{aligned} \quad (3-25)$$

根据式(3-24), 可以得到

$$v - \sum_{j=1}^{t-1} \alpha_{(s+1)_j} \leq \sum_{i=1}^t \alpha_{(s+1)_i} - \sum_{i=1}^{t-1} \alpha_{(s+1)_i} = \alpha_{(s+1)_t}$$

并结合式(3-23), 可以得到式(3-25)满足

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^N \beta_j(k) \ln \lambda_j - k \ln \lambda \\ & \leq \sum_{j=1}^{t-1} \alpha_{(s+1)_j} \left( \ln \lambda_{(s+1)_j} - \ln \lambda \right) + \alpha_{(s+1)_t} \left( \ln \lambda_{(s+1)_t} - \ln \lambda \right) \\ & = \sum_{j=1}^t \alpha_{(s+1)_j} \left( \ln \lambda_{(s+1)_j} - \ln \lambda \right) \end{aligned} \quad (3-26)$$

由于 $\lambda$ 满足

$$\min(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{\bar{n}}) > \lambda \geq \max(\lambda_{\bar{n}+1}, \lambda_{\bar{n}+2}, \dots, \lambda_{\bar{n}+1})$$

考虑式(3-26), 当 $t < N - \bar{n} + 1$ 时,  $\ln \lambda_{(s+1)_t} - \ln \lambda < 0$

$$\sum_{j=1}^{t-1} \alpha_{(s+1)_j} \left( \ln \lambda_{(s+1)_j} - \ln \lambda \right) < 0$$

当 $t \geq N - \bar{n} + 1$ 时,  $\ln \lambda_{(s+1)_t} - \ln \lambda \geq 0$

$$\sum_{j=1}^t \alpha_{(s+1)_j} (\ln \lambda_{(s+1)_j} - \ln \lambda) < \sum_{j=1}^N \alpha_{(s+1)_j} (\ln \lambda_{(s+1)_j} - \ln \lambda) \leq 0$$

所以

$$\sum_{j=1}^t \beta_j(k) \ln \lambda_j - k \ln \lambda \leq 0$$

式(3-10)成立。

对于平均驻留时间 $t_a$

$$\frac{k}{t_a} \geq \frac{k}{T/N} \geq Ns \quad (3-27)$$

令 $N_0 > N$ ，可以得到

$$\frac{k}{t_a} + N_0 \geq Ns + t \geq N_k$$

由于具体的调度方案需要根据实际的网络情况确定，故平均驻留时间难以确定，但可以注意到平均驻留时间 $t_a > 1$ ，因此当 $\ln \mu / 2 \ln \left(\frac{1}{\lambda}\right) < 1$ 成立，即 $\lambda < \mu^{-\frac{1}{2}}$ ，式(3-11)第二部分恒成立。

综上，式(3-11)成立，证明完毕。

### 3.3 通信和控制的协同设计

根据定理 3.1 中的调度方案，令在 3.2.1 节定义的调度周期 $T = [Nt_a]$ ，由于闭环通信路径使用次数 $\alpha_{i_j}$ 必须为整数，对 $\alpha_{i_j}$ 的求解就可以转化为一个全整数规划的问题，即存在正整数 $\alpha_{i_j}$ ，在满足式(3-23)的约束条件下，使当前周期内的平均代价最小，即求解下式

$$\begin{aligned} & \min(1/T \sum_{j=1}^N \alpha_{i_j} F_{i_j}) \\ (1) \quad & \sum_{j=1}^N \alpha_{i_j} \ln \lambda_{i_j} \leq \sum_{j=1}^N \alpha_{i_j} \ln \lambda \\ (2) \quad & \sum_{j=1}^N \alpha_{i_j} = T \\ (3) \quad & \alpha_{i_j} \geq 0, \alpha_{i_j} \in Z \end{aligned} \quad (3-28)$$

对式(3-28)的求解可以参考文献 Narendra 提出的分支定界法<sup>[93]</sup>，在这里不作赘述。综上所述，对于本文中控制器以及调度方案的设计可以总结为如下定理。

**定理 3.2** 若存在正定矩阵 $P_j, K_j$ ，常数 $0 < \lambda < 1, \mu > 1, \lambda_j \geq 0$ 满足

$$\begin{aligned} (1) \quad & \begin{bmatrix} -\lambda_j^2 P_j & * \\ A^* + B^* K_j C_j & -P_j^{-1} \end{bmatrix} \leq 0 \\ (2) \quad & \min\{\lambda_j\} < \lambda < \mu^{-\frac{1}{2}} \\ (3) \quad & P_j \leq \mu P_i \end{aligned} \quad (3-29)$$

并且通过求得的 $\lambda_j$ 以及实时的网络代价值求解式(3-28)，可以得到最优的闭环

路径调度方案, 其中  $i, j = 1, 2, \dots, N$ 。在最优调度方案下, 系统(3-6)指数稳定, 其指数衰减率为  $\lambda\mu^{\frac{1}{2\tau a}}$ 。

由于式(3-29)是一个非线性矩阵不等式, 故可以考虑用锥补线性化(CCL)算法求解控制增益  $K_j$  以及衰减率  $\lambda_j$ 。具体的步骤在算法 3.1 中进行了详细的描述。

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \text{Tr}(P_j Q_0 + P_0 Q_j) & (3-30) \\ (1) \quad & \begin{bmatrix} -\lambda_j^2 P_j & * \\ A^* + B^* K_j C_j & -Q_j \end{bmatrix} \leq 0 \\ (2) \quad & \begin{bmatrix} P_j & * \\ I & Q_j \end{bmatrix} \geq 0 \end{aligned}$$

### 算法 3.1

步骤 1: 选择合适的初始  $\lambda_j$  使得式(3-30)的约束条件(1),(2)成立, 并得到初始解  $P_j, Q_j$ , 令  $P_0 = P_j, Q_0 = Q_j$ 。

步骤 2: 将  $P_0$  和  $Q_0$  代入式(3-30), 得到新的解  $P_j, Q_j, K_j$ 。

步骤 3: 验证步骤 2 中的  $P_j, K_j$  是否满足式(3-29)约束条件(1), 若满足, 跳到下一步, 否则令  $P_0 = P_j, Q_0 = Q_j$ , 回到步骤 2。

步骤 4: 根据步骤 3 中更新的  $P_j, K_j$ , 求解满足式(3-29)约束条件(1)的  $\lambda_j$  的最小值。

步骤 5: 同理求解所有的  $P_j, K_j, \lambda_j, j=1, 2, 3 \dots N$ 。

步骤 6: 利用求得的  $P_j$  得到满足式(3-29)约束条件(2),(3)最小常数  $\mu$  以及  $\lambda$ 。

步骤 7: 根据通信网络的路径情况计算路径的当前代价并根据调度方案的周期  $T$  以及  $\lambda$ , 将  $\lambda_j$  代入式(3-28), 用分支定界法求解当前周期内闭环通信路径使用次数  $\alpha_j$ 。

## 3.4 数值仿真

本文分别采用了 MATLAB 以及 LabVIEW 两种仿真软件进行数值仿真, MATLAB 仿真简单易实现, 仿真结果明确; LabVIEW 仿真额外加入了噪声的影响, 并且以实际倒立摆作为被控对象, 仿真结果更加直观。

### 3.4.1 MATLAB 数值仿真

考虑系统受控对象 (3-6), 其参数  $A$  和  $B$  分别为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 & -0.0166 & -0.006 \\ 0 & 1 & -0.3374 & -0.0166 \\ 0 & 0 & 1.0996 & 0.1033 \\ 0 & 0 & 2.0247 & 1.0996 \end{bmatrix} \quad B^* = \begin{bmatrix} 0.0045 \\ 0.0896 \\ -0.0068 \\ -0.1377 \end{bmatrix}$$

受控对象的模型数据参考 Zhao 的一篇文献<sup>[94]</sup>, 假设系统依次使用三条闭

环路径,其时延分别为 0 和 1 以及 2, 并且对应的路径代价值为 2,1,0。为了简化仿真,假设代价值不变,即路径使用次数不改变。采用满足定理 3.1 的调度方案,当设定周期 $T=10$ 时,选取 $\lambda = 0.85$ ,并根据算法 3.1 计算子系统路径的衰减率,对应的控制增益 $K_i$ 以及对应闭环通信路径使用次数 $\alpha_i$ 如下

$$\lambda_1=0.7869, \lambda_2=0.9864, \lambda_3=1.0902$$

$$K_1 = [0.9002 \ 1.4173 \ 31.4030 \ 9.7111]$$

$$K_2 = [0.0770 \ 1.0154 \ 17.6574 \ 6.8246]$$

$$K_3 = [0.0060 \ 0.7804 \ 10.2343 \ 4.7432]$$

$$\alpha_1 = 4, \alpha_2 = 6, \alpha_3 = 0$$

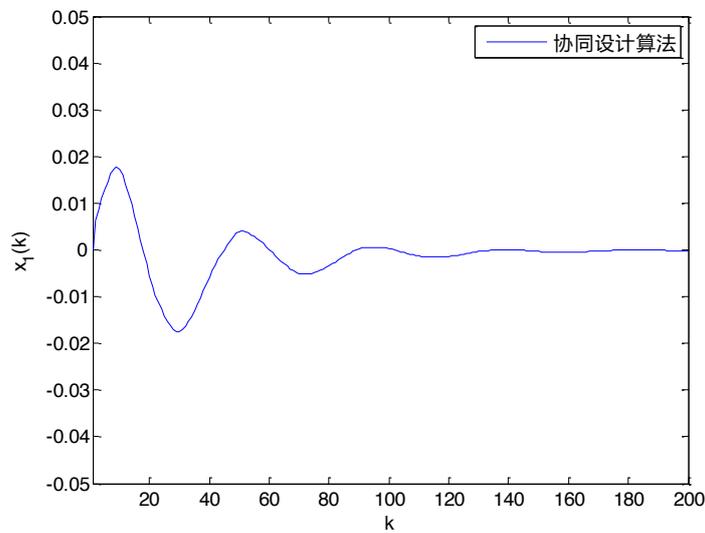


图3-2 协同设计算法轨迹图

Figure 3-2. Trajectory diagram of collaborative design algorithms

图 3-2 表示当系统 (3-6) 的初始状态  $x_0 = [0 \ 0.1 \ 0 \ 1]^T$  时系统的状态轨迹图,验证了算法的稳定性。

当系统采用同代价值的另一组路径使用次数时,即 $\alpha_1=5, \alpha_2=4, \alpha_3=1$ ,状态轨迹对比如图 3-3 所示。

选取另一组不同路径使用次数,增加短时延闭环路径次数,调度方案为 $\alpha_1 = 5, \alpha_2 = 5, \alpha_3 = 0$ ,其稳定性接近协同设计算法,状态轨迹图对比如图 3-4 所示。

三种调度方案的代价值对比如图 3-5 所示。

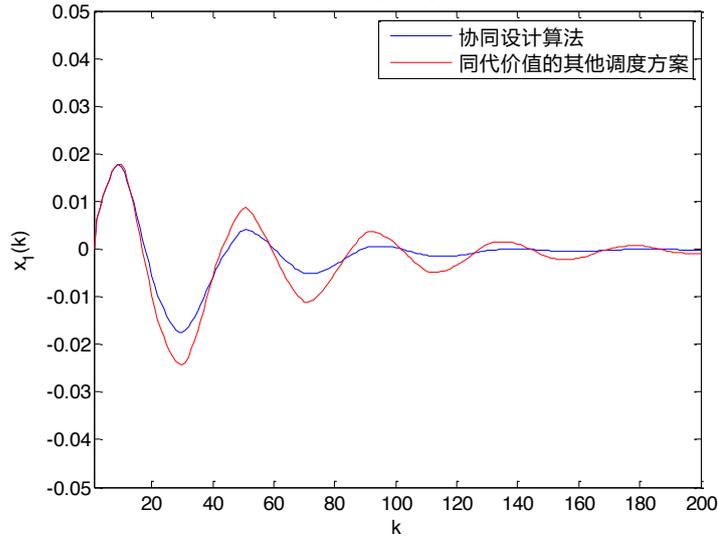


图3-3 协同设计算法与同代价值方案状态轨迹对比

Figure 3-3. Comparisons of state trajectories between cooperative design algorithm and cost-effective schemes

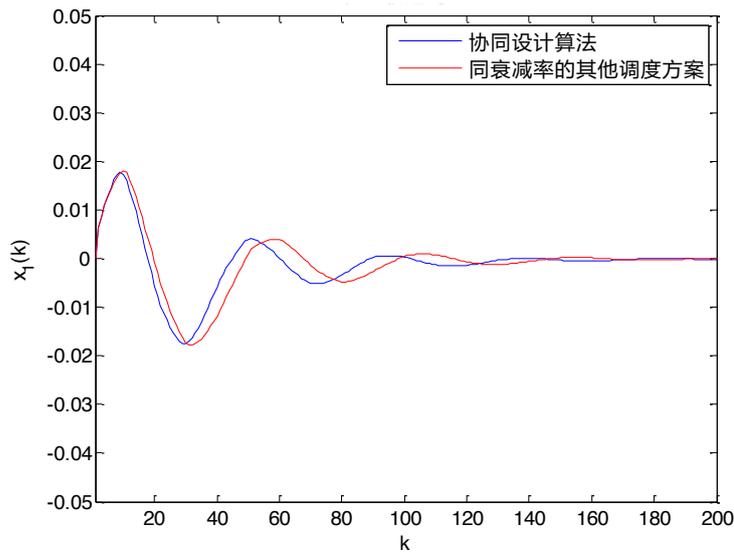


图3-4 协同设计算法与相近稳定性方案对比

Figure 3-4. Comparisons between collaborative design algorithms and approximate stability schemes

MATLAB 数值仿真分别将两组具有相同调度顺序以及控制增益的调度方案，置于同等代价值约束下进行比较，发现采用本文设计方法的调度方案在系统稳定性上具有更大的优势。另外当两组调度方案都具有相似控制性能的前提下，发现采用本文设计方法的调度方案具有更低的代价值。通过两组仿真对比图，可以证明算法在稳定性和代价值方面都取得了较好的效果。

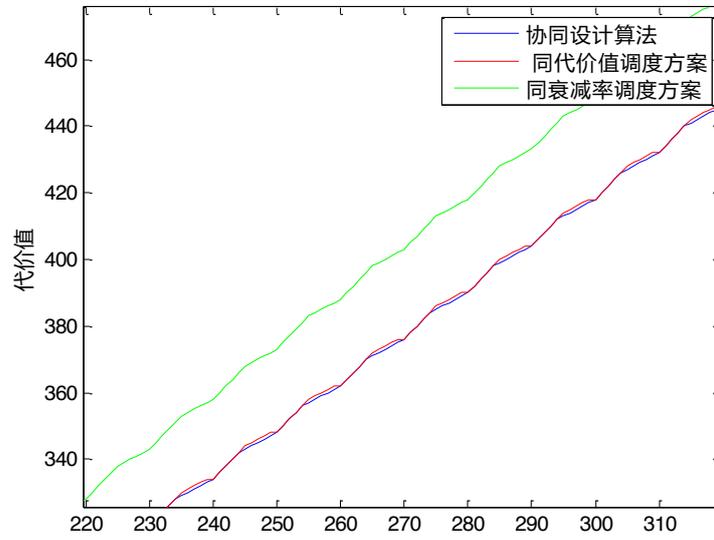


图3-5 三种不同方案的代价值对比

Figure 3-5. Cost-value comparison of three different schemes

### 3.4.2 LabVIEW 虚拟仪器仿真

本例考虑小车-倒立摆系统，但使用 MATLAB/LabVIEW 联合仿真的方法来验证我们提出的全资源预测控制策略和算法的有效性。系统实现的架构见图 3-6，具体的实施框图如图 3-7、3-8、3-9。其中受控对象即小车-倒立摆系统在 LabVIEW 中实现，而控制以及调度部分则在 MATLAB 中实现，二者通过 LabVIEW 中的 MATLAB 脚本调用实现联合仿真。LabVIEW 中的小车-倒立摆系统添加了一个很小的外部扰动以模拟真实情况。因此，与仅基于 MATLAB 的纯数值仿真相比，这一联合仿真方案具有如下优点：

- (1) LabVIEW 中实现的小车-倒立摆系统更为真实的模拟了受控对象；
- (2) 计算资源的具体定量描述也更为真实，因此可更有效的验证本文中提出的控制策略和算法。

选取一级倒立摆模型进行建模，取摆杆质量  $m = 5\text{kg}$ ，小车质量  $M = 1\text{kg}$ ，其中摆杆质量均匀且长度为  $20\text{m}$ ，通过对倒立摆进行受力分析，可以得到倒立摆系统的状态空间表达式。

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -mg/M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & (M+m)g/Ml & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \\ 0 \\ -1/Ml \end{bmatrix} u$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -49 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 2.94 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -0.05 \end{bmatrix}$$

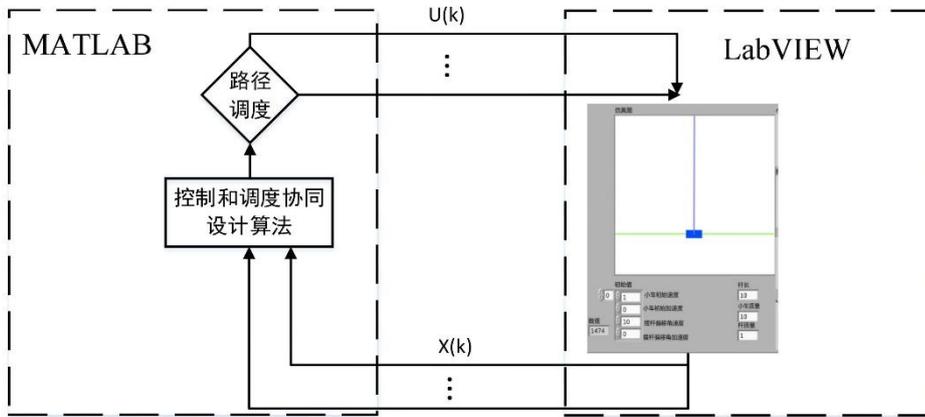


图3-6 MATLAB 与 LabVIEW 联合仿真系统结构图

Figure 3-6. Structure diagram of the joint simulation system of MATLAB and LabVIEW

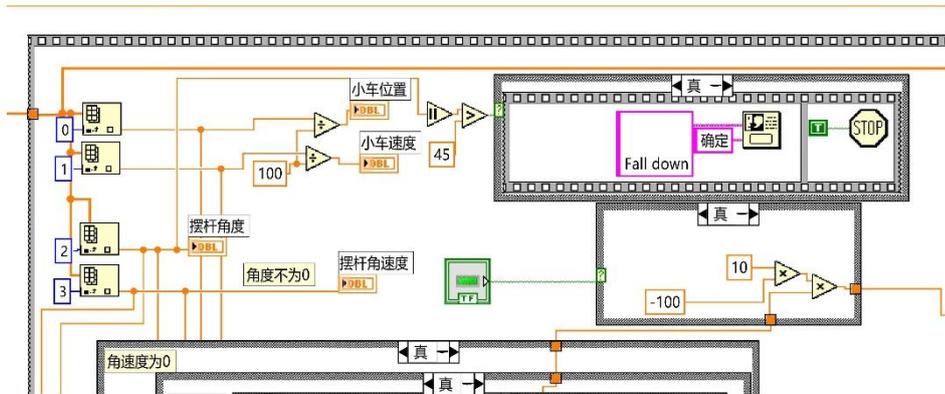


图3-7 LabVIEW 具体实施框图(a)

Figure 3-7. LabVIEW implementation block diagram (a)

根据算法 3.1 计算衰减率以及控制增益:

$$\lambda_1 = 0.8008, \lambda_2 = 1.06, \lambda_3 = 1.6393$$

$$K_1 = [0 \ 0 \ 49.0279 \ 0]$$

$$K_2 = [-2.9846 \ 0 \ 3.7657 \ 0]$$

$$K_3 = [-4.5740 \ 0 \ 0.3423 \ 0]$$

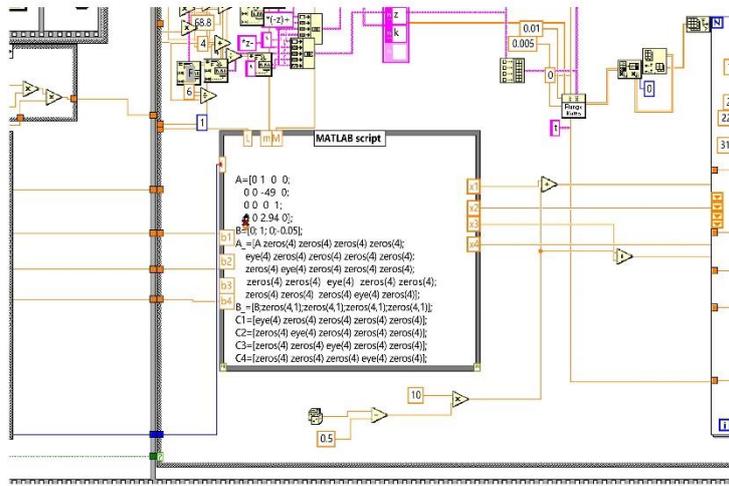


图3-8 LabVIEW 具体实施框图(b)

Figure 3-8. LabVIEW implementation block diagram (b)

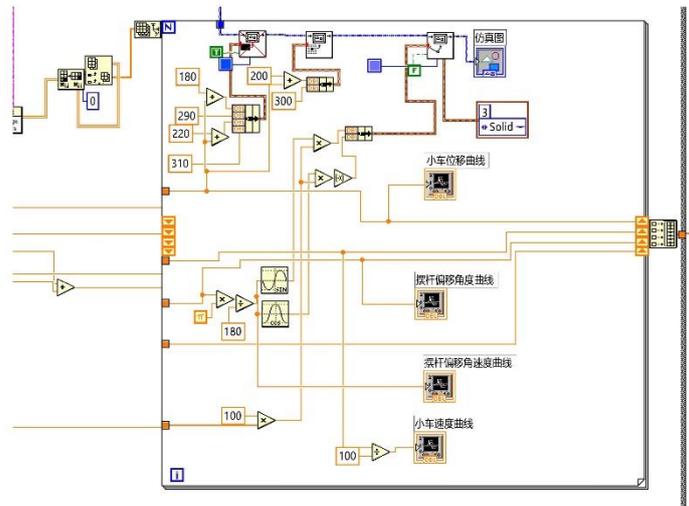


图3-9 LabVIEW 具体实施框图(c)

Figure 3-9. LabVIEW implementation block diagram (c)

路径以及代价值描述和 MATLAB 仿真中相同, 设定倒立摆的初始状态值  $x_0 = [0 \ 1 \ 0 \ -1]^T$ , 在给定代价值限制下, 利用算法 3.1 求最优调度方案:  $\alpha_1 = 7, \alpha_2 = 3, \alpha_3 = 0$ , 当给系统添加控制输入和扰动时, 倒立摆的运行情况如图 3-10 所示。在相同代价值限制下, 设定的任意其他调度方案都无法使倒立摆系统保持稳定, 运

运行情况如图 3-11 所示。

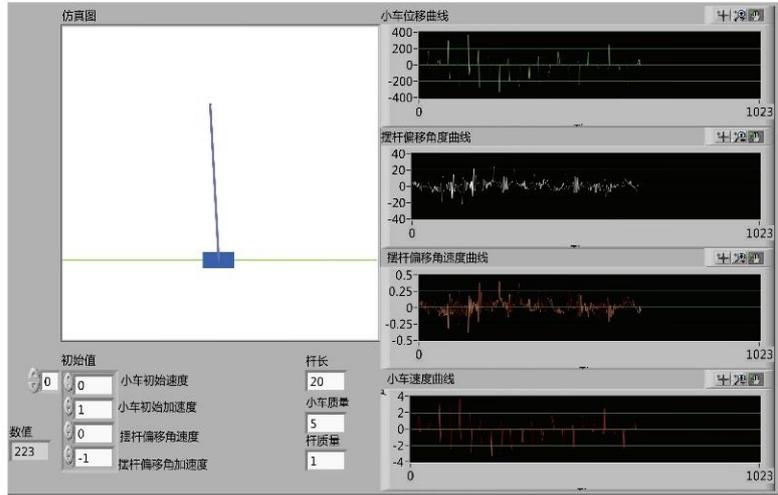


图3-10 协同设计算法倒立摆运行图

Figure 3-10. Collaborative design algorithm inverted pendulum diagram

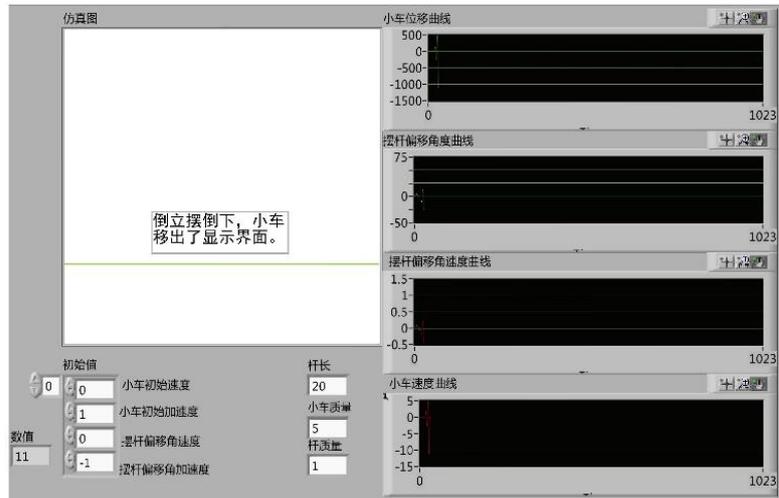


图3-11 同代价值方案倒立摆运行图

Figure 3-11. Operating chart of inverted pendulum with same value scheme

### 3.5 本章小结

本章研究了多径路由通信下的网络化控制系统的调度和控制的协同设计问题。

从兼顾控制系统稳定性和网络负载均衡的通信和控制协同设计的角度出发，提出了多径路由调度算法和相关的控制器设计方法，并给出了周期性的调度方案，该调度方案不仅保证了系统的指数稳定性，并在考虑实时网络情况的前提下，实现了系统的局部最优。该设计方案假定了调度算法的周期性，并限制了网络的条件，未来将进一步放宽该限制，研究更一般的调度和控制协同设计方法。

## 第四章 结论与展望

### 4.1 结 论

在分布式计算和网络技术的快速发展的推动下，控制系统和网络的结合越来越紧密，因此诞生出越来越复杂的结构和行为。本文从协同设计的角度对多径路由网络化控制系统的建模进行了研究，将通信网络和控制系统进行分离和综合，并把问题分为网络调度和控制器设计两个子问题，最后将这两个子问题放在统一的目标函数下进行求解。这种新模式的本质是允许通信网络与控制器设计共同进行。协同设计给网络控制的研究带来了新的活力，许多纯粹的系统控制器设计问题现在可以在协同设计范式下得到很好地解决。论文提出的方案主要以保证系统稳定性为前提，针对良好动态性能的要求，可以改变系统条件，如第三章可以通过给定更小的指数衰减率，为系统取得更好的动态性能。

在网络化控制系统领域中，本文做出的贡献主要包括改进的路径调度算法和控制器设计方法。具体包括以下几点：

- 1.针对基于多径路由的时间驱动的网络化控制系统体系，研究了一类具有区间有界时变时滞的随机系统的相应问题，同时考虑了在多径路由中丢包和时延的独特性，将时延建立成马尔可夫跳变系统模型，该模型描述了控制信号在有损通信链路上的传输。最后将该通信模型与闭环性能分析模型相结合，通过适当选择事件阈值以及结合基于包的控制方法，提出了可以最小化预期损失的控制器设计方法。

- 2.针对基于多径路由通信的网络化控制系统的调度策略和控制器的联合设计问题。提出了参数化路径切换的策略，该策略将协同设计问题分为两个定义明确的网络和控制设计任务子问题，并对这两个子问题给出了最优解，即网络的运行应最大限度的提高随机延迟约束的可靠性，控制设计则应优化闭环系统的稳定性，该模型简化了当前的问题，以便能够描述网络通信和控制性能之间的权衡。并对如何解决这些问题进行了说明，最后，通过对切换策略的一维搜索找到联合优化设计的最终解决方案。

### 4.2 展 望

随着物联网浪潮的到来和云计算技术的日趋成熟，针对网络化控制的调度和

控制协同设计, 现有的研究成果还不足以解决控制领域中长期存在的一些问题, 现有理论中还有极大的空缺需要通过更加深入的研究来补充。本文针对网络化控制的协同设计有了一定的成果, 但未来发展仍然有很长的一段路需要走。本研究以调度和控制的协同设计方法探讨无基于多径路由网络的网络化控制系统中存在的几个关键问题。同时, 基于现有方法的一些还未解决的挑战和局限性, 确定了一些未来的研究方向。未来的研究方向如下

1. 我们希望在后期能将网络扩展到更一般的条件进行考虑, 即放宽网络条件的限制和假设, 设计一种更加通用和普适的控制器设计和网络调度策略以补偿网络缺陷。在这边我们可以考虑网络使用竞争机制来处理同时的通道访问请求或者使用基于状态的优先级来确定对网络的访问顺序。

2. 另一个扩展可能是考虑一组通过共享介质传输信息的分布式控制器。在这种情况下, 通信速率和控制性能方面的性能将取决于介质访问方案, 适当的介质访问协议(可能包括优先级的设计)也将对控制器的设计产生极大的影响。现有的多访问协议以一种不可知论的方式执行这个角色, 它与通过网络运行的应用程序保持隔离。这种方法不能提供令人满意的控制性能保证。为了在新兴的工业应用中使用无线网络, 我们必须能够系统地设计无线网络控制系统, 在资源受限的网络中提供有保证的性能。

3. 另外, 反馈系统的稳定要求通信资源的供需平衡, 调度和控制协同设计通过对供给进行协调以满足需求来实现这种平衡。在本文中, 重点研究了状态反馈网络控制。未来, 我们希望通过通信调度和控制协同设计来研究输出反馈网络化控制系统。通信理论和控制理论之间的联系有待进一步发展。我们的最终目标是通过通信及控制协同设计开发多变量网络化控制理论。

要设计一个良好的协同设计理论方法, 需要同时洞察和理解网络通信和控制理论之间的交互方式。根据交互方式的不同, 选择不同的协同设计方案切入点, 例如信道容量分配、传输调度和编码机制等, 最后, 与算法设计和实现复杂性的增加相比, 需要明确协同设计系统的性能优势体现, 对两者进行权衡。

## 参考文献

- [1] CETINKAYA A,ISHII H,HAYAKAWA T.Networked control under random and malicious packet losses[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2017,62(5):2434-2449.
- [2] GUPTA R A,CHOW M Y.Networked control system: overview and research trends[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,57(7):2527-2535.
- [3] YANG T C.Networked control system: a brief survey[J].Control Theory and Applications,2006,153(4):403-412.
- [4] 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.
- [5] ANTSAKLIS P,BAILLIEUL J.Guest editorial special issue on networked control systems[J].Automatic Control IEEE Transactions on,2004,49(9):1421-1423.
- [6] ANTSAKLIS P,BAILLIEUL J.Special issue on technology of networked control systems[J].IEEE Proceedings,2007,95(1):5-8.
- [7] EL-FARRA N H,MHASKAR P.Special issue on “control of networked and complex process systems”[J].Computers & Chemical Engineering,2008,32(9):1963.
- [8] AMIN S M.Smart grid: overview,issues and opportunities.advances and challenges in sensing, modeling,simulation,optimization and control[J].European Journal of Control, 2011, 17(5-6):547-567.
- [9] SEILER P,SENGUPTA R.An  $H^\infty$  approach to networked control[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2005,50(3):356-364.
- [10] LEE K C,LEE S,MAN H L.Remote fuzzy logic control of networked control system via profibus-dp[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2003,50(4):784-792.
- [11] MENG C,WANG T,CHOU W,et al.Remote surgery case: robot-assisted teleneurosurgery[C].// IEEE International Conference on Robotics and Automation,New Orleans,2004:819-823.
- [12] OGREN P,FIGLIOLI E,LEONARDI N E.Cooperative control of mobile sensor networks: adaptive gradient climbing in a distributed environment[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2004,49(8):1292-1302.
- [13] MOORE B J,PASSINO K M.Distributed task assignment for mobile agents[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2007,52(4):749-753.
- [14] MARTINEZ S,BULLO F,CORTES J,et al.On synchronous robotic networks-part I: models, tasks,and complexity[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2007,52(12):2199-2213.
- [15] MARTINEZ S,BULLO F,CORTES J,et al.On synchronous robotic networks-part II: time complexity of rendezvous and deployment algorithms[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2007,52(12):2214-2226.
- [16] MONTESTRUQUE L A,ANTSAKLIS P J.Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times[J].IEEE Transactions on Automatic Control, 2004,49(9):1562-1572.
- [17] WANG X,LEMMON M.Event-triggering in distributed networked control systems[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2011,56(3):586-601.
- [18] NESIC D,TEEL A R.Input-output stability properties of networked control systems[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2004,49(10):1650-1667
- [19] WALSH G C,YE H,BUSHNELL L G.Stability analysis of networked control systems[J].Computer Engineering & Applications,2002,10(3):438-446.
- [20] FRIDMAN E.Discussion on:“stabilization of networked control systems with data packet dropout and transmission delays: continuous-time case”[J].European Journal of Control, 2005,11(1):50-51.
- [21] JING W,CHEN T.Design of networked control systems with packet dropouts[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2007,52(7):1314-1319.

- [22] WITRANT E, WIT C C D, GEORGES D, et al. Remote stabilization via communication networks with a distributed control law[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(8): 1480-1485.
- [23] ARAÚJO J. Design, implementation and validation of resource-aware and resilient wireless networked control systems[D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2014.
- [24] DEMIREL B. Architectures and performance analysis of wireless control systems[D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2015.
- [25] GOJMERAC I, ZIEGLER T, RICCIATO F, et al. Adaptive multipath routing for dynamic traffic engineering[C]. // IEEE Global Telecommunications Conference, California, 2003: 3058-3062.
- [26] YUN N, WU X, KANG J, et al. Method of control performance and network qos co-design of networked control systems[C]. // Chinese Control Decision Conference, Atlanta: 2010: 356-360.
- [27] TIPSUWAN Y, CHOW M Y. Control methodologies in networked control systems[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(10): 1099-1111.
- [28] PLOPLYS N J, KAWKA P A, ALLEYNE A G. Closed-loop control over wireless networks[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2004, 24(3): 58-71.
- [29] HRISTU-VARSAKELIS D, LEVINE W S. An undergraduate laboratory for networked digital control systems[J]. Control Systems IEEE, 2005, 25(1): 60-62.
- [30] BAILLIEUL J, ANTSAKLIS P J. Control and communication challenges in networked real-time systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 9-28.
- [31] LAMNABHI-LAGARRIGUE F, ANNASWAMY A, ENGELL S, et al. Systems & control for the future of humanity, research agenda: current and future roles, impact and grand challenges[J]. Annual Reviews in Control, 2017(43): 1-64.
- [32] PANDEY S K, KIM, KIH YUN, et al. A review of sensor-based methods for monitoring hydrogen sulfide[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2012, 32(1): 87-99.
- [33] KUMAR, DILIP. Performance analysis of energy efficient clustering protocols for maximising lifetime of wireless sensor networks[J]. Iet Wireless Sensor Systems, 2014, 4(1): 9-16.
- [34] LEHMANN, LUNZE. Event-based control with communication delays and packet losses[J]. International Journal of Control, 2012, 85(5): 563-577.
- [35] GU K, CHEN J, KHARITONOV V L. Stability of time-delay systems[M]. Stockholm: Springer Science & Business Media, 2003.
- [36] CLOOSTERMAN M B G, HETEL L, WOUW N V D, et al. Controller synthesis for networked control systems[J]. Automatica, 2010, 46(10): 1584-1594.
- [37] LI F, PENG S, WU L, et al. Quantized control design for cognitive radio networks modeled as nonlinear semi-markovian jump systems[J]. Industrial Electronics IEEE Transactions on, 2015, 62(4): 2330-2340.
- [38] HAN Q L. Absolute stability of time-delay systems with sector-bounded non-linearity[J]. Automatica, 2005, 41(12): 2171-2176.
- [39] PENG C, TIAN Y, TADÉ M O. State feedback controller design of networked control systems with interval time-varying delay and nonlinearity[J]. International Journal of Robust & Nonlinear Control, 2010, 18(12): 1285-1301.
- [40] ZHANG, SHI, CHEN, 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.
- [41] ZHANG L, GAO H, KAYNAK O. Network-induced constraints in networked control systems-a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 9(1): 403-416.
- [42] HEEMELS W P M H, TEEL A R, WOUW N V D, et al. Networked control systems with communication constraints: tradeoffs between transmission intervals, delays and performance[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(8): 1781-1796.
- [43] LAMPERSKI A, DOYLE J C. On the structure of state-feedback LQG controllers for distributed systems with communication delays[J]. IEEE Decision & Control & European Control. 2011, 9(1): 403-416.
- [44] MATNI N, DOYLE J C. A dual problem in  $H_2$  decentralized control subject to delays[C]. // American Control Conference, Atlanta, 2013: 70-82.
- [45] LIU A, YU L, ZHANG W A. One-step receding  $H^\infty$  control for networked control systems with random delay and packet disordering[J]. Isa Transactions, 2011, 50(1): 44-52.

- [46] LIU A,ZHANG W A,YU L,et al.New results on stabilization of networked control systems with packet disordering[J].Automatica,2015,52(C):255-259.
- [47] YOON J K,TILBURY D M,SOPARKAR N R.A design methodology for distributed control systems to optimize performance in the presence of time delays[J].International Journal of Control,2001,74(1):58-76.
- [48] SCHENATO L,SINOPOLI B,FRANCESCHETTI M,et al.Foundations of control and estimation over lossy networks[J].Proceedings of the IEEE,2007,95(1):163-187.
- [49] PLOPLY N J,KAWKA P A,ALLEYNE A G.Closed-loop control over wireless networks[J].Control Systems IEEE,2015,24(3):58-71.
- [50] SUN Y,GAO X,BELDING-ROYER E M,et al.Model-based resource prediction for multi-hop wireless networks[J].IEEE International on Mobile Ad-hoc & Sensor Systems,2004,24(3):114-123.
- [51] XIONG J,LAM J.Stabilization of linear systems over networks with bounded packet loss[J].Automatica,2007,43(1):80-87.
- [52] DING B.Stabilization of linear systems over networks with bounded packet loss and its use in model predictive control[J].Automatica,2011,47(11):2526-2533.
- [53] HOU Z,BU X.Model free adaptive control with data dropouts[J].Expert Systems with Applications,2011,38(8):10709-10717.
- [54] DING B. Ding B. A synthesis approach of model predictive control for linear systems over networks with bounded packet loss[C].//IEEE ICCA 2010,IEEE, 2010: 2258-2263.
- [55] MAHMOUD M S,KHAN G D.Dynamic output feedback of networked control systems with partially known markov chain packet dropouts[J].Optimal Control Applications & Methods,2015,36(1):29-44.
- [56] WANG Z,HO D W C,LIU Y,et al.Robust  $H^\infty$  control for a class of nonlinear discrete time-delay stochastic systems with missing measurements[J].Automatica,2009,45(3):684-691.
- [57] WALSH G C,YE H,BUSHNELL L G.Stability analysis of networked control systems[J].Computer Engineering & Applications,2002,10(3):438-446.
- [58] NILSSON J,BO B,WITTENMARK B.Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays [J].Automatica,1998,34(1):57-64.
- [59] CHEN S,NAHRSTEDT K.Distributed quality-of-service routing in ad-hoc networks[J].IEEE Journal on Selected Areas in Communications,1999,17(8):1488-1505.
- [60] CHEN C S,WONG W S.Bandwidth allocation for wireless multimedia systems with most regular sequences[J].IEEE Transactions on Wireless Communications,2005,4(2):635-645.
- [61] PAGANINI F,TANG A,FERRAGUT A,et al.Network stability under alpha fair bandwidth allocation with general file size distribution[J].IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(3):579-591.
- [62] LING S,ZHANG H.Scheduling two gauss-markov systems: an optimal solution for remote state estimation under bandwidth constraint[J].IEEE Transactions on Signal Processing,2012, 60(4): 2038-2042.
- [63] ZHIVOGLYADOV P V,MIDDLETON R H.Networked control design for linear systems[J].Automatica,2003,39(4):743-750.
- [64] 邓士普.网络环境下直流电机的时延补偿和控制[D].杭州:浙江大学,2004.
- [65] MCQUILLAN J M,WALDEN D C.The ARPA network design decisions[J].Computer Networks, 1977,1(5):243-289.
- [66] DOYLE J,CARROLL D H. Ccic professional development: routing tcp/ip[M]. Cisco Press, 1998.
- [67] HOWARD R A.Dynamic programming[J].Management Science,1966,12(5):317-348.
- [68] JR L R F,FULKERSON D R,ZIFFER A.Flows in networks[J].Mathematics of Computation, 2009,18(4):319-331.
- [69] DIJKSTRA E W.A note on two problems in connection with graphs[J].Numerische Mathematics,1959,1(1):269-271.
- [70] SHEN M,LIU H,XU K,et al.Routing on demand: toward the energy-aware traffic engineering with OSPF[C].//International Conference on Research in Networking,Springer, Berlin, Heidelberg, 2012: 232-246.

- [71] MOY J T. OSPF: anatomy of an Internet routing protocol[M]. Stockholm: Addison-Wesley Professional, 1998.
- [72] ORAN D. Osi is-is intra-domain routing protocol[J]. *Numerische Mathematics*, 1990, 1(1): 269-271.
- [73] ASTROM K J, WITTENMARK B. Computer controlled systems: theory and design[J]. *Iee Review*, 2012, 31(31): 237-248.
- [74] 俞立, 邵奇可. 网络时延在线估计技术与控制器的协同设计[J]. *自动化学报*, 2007, 33(7): 781-784.
- [75] 姜偕富, 姜培刚. 基于 LMI 方法的网络化控制系统的  $H^\infty$  鲁棒控制[J]. *控制与决策*, 2004, 19(1): 17-21.
- [76] SETO D, LEHOCZKY J P, SHA L. Task period selection and schedulability in real-time systems[C]. // *Proceedings 19th IEEE Real-Time Systems Symposium*, Madrid, 1998: 188-198.
- [77] DAI S L, LIN H, GE S S. Scheduling-and-control codesign for a collection of networked control systems with uncertain delays[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 18(1): 66-78.
- [78] LI J, ZENG P, ZONG X, et al. Communication and control co-design for wireless sensor networked control systems[C]. // *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Shenyang, 2014: 156-161.
- [79] CHEN W, YAO J, QIU L. Stabilization of networked multi-input systems over a shared bus with scheduling/control co-design[C]. // *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, Florence, 2013: 7235-7240.
- [80] ZHAO X, KAO Y, NIU B, et al. Switching stabilization of switched systems composed of unstable subsystems[M]. *Control Synthesis of Switched Systems*. Springer, Cham, 2017: 41-63.
- [81] 孙洪飞, 赵军, 高晓东. 带有时滞摄动的线性切换系统的稳定性[J]. *控制与决策*, 2002, 17(4): 431-434.
- [82] DONG K K, PARK P G, KO J W. Output-feedback control of systems over communication networks using a deterministic switching system approach[J]. *Automatica*, 2004, 40(7): 1205-1212.
- [83] GAO F, ZHONG S, GAO X. Delay-dependent stability of a type of linear switching systems with discrete and distributed time delays[J]. *Applied Mathematics & Computation*, 2008, 196(1): 24-39.
- [84] SUMATHI S, SUREKHA P. LabVIEW based advanced instrumentation systems[M]. Berlin: Springer, 2007.
- [85] HURNI P, BRAUN T. Energy-efficient multi-path routing in wireless sensor networks[C]. // *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless*, Florence, 2008: 72-85.
- [86] SPOHN M A, GARCIA-LUNA-ACEVES J J. Improving route discovery in on-demand routing protocols using two-hop connected dominating sets[J]. *Ad Hoc Networks*, 2006, 4(4): 509-531.
- [87] JAMALI S, SAFARZADEH B, ALIMOHAMMADI H. SQR-AODV: A stable QoS-aware reliable on demand distance vector routing protocol for mobile ad-hoc networks[J]. *Scientific Research and essays*, 2011, 6(14): 3015-3026.
- [88] TEKAYA M, TABBANE N, TABBANE S. Delay remaining energy for aomdv protocol [C]. // *International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless*, Florence, 2011: 11-15.
- [89] SUN Y, GAO X, BELDING-ROYER E M, et al. Model-based resource prediction for multi-hop wireless networks[C]. // *IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc & Sensor Systems*. IEEE, San Francisco, 2004: 114-123.
- [90] 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.
- [91] YEN H H, LIN Y S, LIN S P. Energy-efficient data-centric routing in wireless sensor networks[J]. *Iee Transactions on Communications*, 2006, 88(12): 3025-3029.
- [92] SHAH R C, RABAEY J M. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks[C]. // *2002 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record*, San Francisco, 2002: 350-355.
- [93] NARENDRA P M, FUKUNAGA K. A branch and bound algorithm for feature subset selection[J]. *IEEE Trans Computers*, 1977, 26(9): 917-922.

- [94] 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,2018,4(5):2441-2455.

## 致 谢

论文完成后,我想借此机会感谢为撰写论文提供宝贵帮助的许多人。我最深的谢意首先是我的导师赵云波教授,他带领我完成了这篇论文的所有写作阶段。他的批判性评论、不断的鼓励和引导,不仅对我的学术追求有了很大的启迪,而且对我的道德学术修养也有了很大的培养。如果没有他一贯而富有启发性的指导,本论文就不可能达到目前的阶段。此外,我也衷心感谢浙江工业大学信息工程学院的全体老师,他们在我三年的研究生期间,对我的教学给予了我无私的支持,他们的讲课拓宽了我在控制领域的视野,帮助我为论文的撰写奠定了必要的基础,我很荣幸能认识到那些可敬的老师。此外,我还要感谢我的师兄李鹏飞,还有实验室同学黄涛、韩康、袁征、李天舒、何江涛等,他们在我的写作中帮助了我,并鼓励了我很多。没有他们,我的研究生生活会失去很多精彩。最后,我深深地感激我亲爱的父母和女友,他们总是支持我,愿意和我讨论,并提供宝贵的见解。他们的帮助和支持伴随着我走过了这篇论文的艰难历程和我生命中的每一刻。

## 作者简介

### 1 作者简介

1993 年 12 月出生于江苏省苏州市。

2016 年 9 月——2019 年 6 月，浙江工业大学信息工程学院控制科学与工程专业学习，攻读工学硕士学位。

### 2 攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] 赵云波, 姚俊毅. 多径路由网络化控制系统的建模和稳定性分析[C]. 第 37 届中国控制会议.
- [2] 赵云波, 姚俊毅, 倪洪杰. 多径路由网络化控制系统的路径调度与控制器协同设计[J]. 系统科学与数学.
- [3] 马翠芹, 姚俊毅, 韩康, 赵云波. 计算受限控制系统的一种全资源预测控制方法[J]. 自动化学报

### 3 参与的科研项目及获奖情况

- [1] 赵云波. 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, 国家自然科学基金项目. 编号: 61673350.

### 4 发明专利

- [1] 赵云波, 姚俊毅. 一种基于多径通信网络化控制系统的路径调度与控制器协同设计方法. 中国, 201811196065.2[P]. 2018-10-15.

## 学位论文数据集

密 级*	中图分类号*	UDC*	论文资助
公开	TP273	621.3	国家自然科学基金
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	工学硕士	全日制学术型硕士
论文题名*	多径路由通信下网络化控制系统的协同设计与分析		
关键词*	多径路由, 控制系统, 负载平衡, 协同设计, 指数稳定		论文语种*
并列题名*	cooperative design and analysis of networked control systems under multipath routing communication		中文
作者姓名*	姚俊毅	学 号*	2111603039
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	310014
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	三年	2019
论文提交日期*	2019.5.20		
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	赵云波教授	宣琦, 陈晋音, 翔云, 夏永祥	
电子版论文提交格式: 文本 ( <input checked="" type="checkbox"/> ) 图像 ( <input type="checkbox"/> ) 视频 ( <input type="checkbox"/> ) 音频 ( <input type="checkbox"/> ) 多媒体 ( <input type="checkbox"/> ) 其他 ( <input type="checkbox"/> )			
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*	47		
注: 共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 22 项。			