

孙业国 著

网络控制系统的 分析与控制



科学出版社

网络控制系统的分析与控制

孙业国 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

网络控制系统及相关研究是近年来科研领域的研究热点,该项研究不仅具有重要的理论意义,而且具有广泛的应用价值。本书的内容主要取材于作者及合作者近几年的研究成果,深入浅出地讲解网络控制系统的渐近稳定性分析与控制和有限时间稳定性分析与控制。本书侧重于介绍网络控制系统的渐近和有限时间稳定性与控制算法的一些新方法,这些方法有的是作者近年来所提出的,有的是作者对原方法进行的改进和发展。

本书可供高等院校和科研院所从事网络控制系统研究的教师、科研人员、博士和硕士研究生等阅读,同时可作为高等院校控制理论与控制工程、计算机应用技术、系统工程、机械工程与自动化、信息与计算科学、运筹学与控制论等相关专业的高年级本科生、硕士和博士研究生的专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

网络控制系统的分析与控制/孙业国著. —北京: 科学出版社, 2019.11

ISBN 978-7-03-063151-0

I. ①网… II. ①孙… III. ①互联网络—控制系统—分析②互联网络—控制系统—系统设计 IV. ①TP393.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第244841号

责任编辑: 姚庆爽 / 责任校对: 彭珍珍

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年11月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019年11月第一次印刷 印张: 10 3/4

字数: 215 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

20 世纪 90 年代以来,随着计算机技术、通信技术、网络技术及控制理论的发展,网络控制技术及在网络平台上构筑而成的网络控制系统已成为自动化领域技术发展的热点。网络控制系统主要分为网络控制、基于网络的控制、多智能体系统三个研究领域。网络控制是针对网络自身的控制,主要是对通信网络的网络路由、网络流量等的调度与控制;基于网络的控制是对被控系统的控制,网络只是作为一种传输通道,研究时考虑网络自身存在的问题对系统的影响,对整个闭环系统进行建模、性能分析及控制器的设计等;多智能体系统主要是研究网络的拓扑结构和多智能体之间的相互作用对整个系统行为的影响。

本书第 1 章主要阐述网络控制系统的研究背景及意义,同时分别对网络控制系统的无限时间控制与有限时间控制进行综述。在综述前人研究成果的基础上,指出目前网络控制系统研究存在的问题及本书要研究的问题。

本书第 2~8 章主要针对基于网络的控制系统中的时延、丢包、多输入多输出问题,基于 Lyapunov 稳定性理论、切换系统理论、Markov 跳变系统理论、时滞系统理论及线性矩阵不等式方法,对线性系统、非线性系统的网络控制问题,以及网络控制系统的实际应用进行了深入地研究。

本书第 9~11 章主要针对网络控制系统中的时延和丢包问题,基于有限时间稳定性理论,运用线性矩阵不等式,对时延网络控制系统的有限控制、丢包网络控制系统的有限时间控制、同时受时延和丢包影响的网络控制系统的有限时间控制等问题展开深入研究。

本书的相关研究内容及本书的出版得到了国家自然科学基金(网络控制系统的有限时间分析与综合,项目编号:61403157)和安徽省高等学校自然科学研究重点项目(面向危险任务的异构多机器人混杂系统的协同控制研究,项目编号:KJ2019ZD48)等多个项目的资助,在此表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限，无论在理论分析还是仿真实验方面，都难免存在不足之处，恳请同行专家和广大读者批评指正，同时也欢迎同行专家和广大读者针对相关问题进行学术交流与讨论。

作者邮箱：yeguosun@126.com。

作 者

2019年9月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 背景及意义	1
1.2 网络控制系统无限时间控制研究现状	3
1.2.1 时延网络控制系统的分析与综合	3
1.2.2 丢包网络控制系统的分析与综合	6
1.2.3 面向复杂环境的网络控制系统优化控制	8
1.2.4 网络控制系统所面临的挑战性问题与可能的解决途径	11
1.2.5 网络控制系统研究方法的发展与进化	13
1.3 网络控制系统有限时间控制研究现状	16
1.4 小结	17
第 2 章 单边随机时延网络控制系统的分析与控制	18
2.1 引言	18
2.2 单边随机时延网络控制系统的基本模型	18
2.3 单边随机时延网络控制系统的稳定性分析	21
2.4 单边随机时延网络控制系统的控制器设计	25
2.5 数值仿真示例	26
2.6 小结	28
第 3 章 双边随机时延网络控制系统的分析与控制	29
3.1 引言	29
3.2 双边随机时延网络控制系统的基本模型	29
3.3 双边随机时延网络控制系统的稳定性分析	32
3.4 双边随机时延网络控制系统的控制算法	36
3.5 数值仿真示例	38
3.6 小结	39
第 4 章 丢包网络控制系统的分析与控制	41
4.1 引言	41
4.2 随机丢包网络控制系统的分析与控制	41

4.2.1	随机丢包网络控制系统的模型化	41
4.2.2	任意丢包过程网络控制系统的分析与控制	43
4.2.3	Markov 丢包过程网络控制系统的分析与控制	45
4.2.4	准 Markov 丢包过程网络控制系统的分析与控制	48
4.2.5	数值仿真示例与比较分析	51
4.3	确定性丢包网络控制系统的指数稳定性分析	56
4.3.1	确定性丢包网络控制系统的模型化	56
4.3.2	基于平均逗留时间方法的指数稳定性分析	59
4.3.3	数值仿真示例	62
4.4	小结	63
第 5 章	同时受时延与丢包干扰的网络控制系统的分析与控制	64
5.1	引言	64
5.2	同时受时延与丢包干扰的网络控制系统的模型化	64
5.3	同时受时延与丢包干扰的网络控制系统的稳定性分析	66
5.4	基于锥补线性化方法的控制器设计	70
5.5	基于线性矩阵不等式方法的控制器设计	72
5.6	数值仿真示例	74
5.7	小结	77
第 6 章	非线性网络控制系统的分析与综合	79
6.1	引言	79
6.2	非线性网络控制系统的组织结构与特点	79
6.3	Razumikhin 方法与线性网络控制系统的时延界	80
6.4	基于 Razumikhin 方法的非线性网络控制系统的分析与控制	83
6.5	数值仿真示例	85
6.6	小结	88
第 7 章	多输入多输出网络控制系统的稳定性分析	89
7.1	引言	89
7.2	多输入多输出网络控制系统的基本模型	89
7.3	基于奇异系统方法的多输入多输出网络控制系统的稳定性分析	93
7.3.1	标称系统的稳定性分析	93
7.3.2	不确定系统的稳定性分析	96
7.3.3	多输入多输出网络控制系统的最大时延界	98
7.3.4	数值例子	100

7.4	时变多输入多输出网络控制系统的稳定性分析	101
7.4.1	时变多输入多输出网络控制系统的模型	101
7.4.2	时变多输入多输出网络控制系统的指数稳定性	104
7.4.3	数值例子	108
7.5	小结	109
第 8 章	网络环境下 Furuta 摆的镇定控制仿真和实验	110
8.1	应用背景与技术需求	110
8.2	Furuta 摆控制系统的模型化与控制器设计	111
8.2.1	Furuta 摆控制系统的组织结构	111
8.2.2	Furuta 摆控制系统的数学模型	112
8.2.3	基于 TrueTime 的 Furuta 摆网络控制系统仿真	115
8.3	网络环境下 Furuta 摆镇定控制的半实物仿真实验	116
8.3.1	控制器与被控对象	117
8.3.2	Matlab 数据接口	117
8.3.3	Java 网络接口	118
8.3.4	Furuta 摆半实物实时仿真实验	120
8.4	网络环境下 Furuta 摆的镇定控制实验与分析	121
8.4.1	实验方案 and 目的	121
8.4.2	实验过程实录	123
8.4.3	实验结果分析	128
8.5	小结	128
第 9 章	时变时延网络控制系统的有限时间控制	129
9.1	模型建立	129
9.2	稳定性分析	132
9.3	控制器设计	135
9.4	数值例子	137
9.5	小结	137
第 10 章	随机丢包网络控制系统的有限时间控制	138
10.1	模型建立	138
10.2	稳定性分析	140
10.3	控制器设计	141
10.4	数值例子	142
10.5	小结	143

第 11 章 时延丢包网络控制系统的有限时间控制	144
11.1 模型建立	144
11.2 稳定性分析	147
11.3 控制器设计	149
11.4 数值例子	151
11.5 小结	152
参考文献	153

第1章 绪 论

1.1 背景及意义

随着计算机技术、网络通信技术和控制科学的日益发展与交叉渗透,控制系统的结构变得越来越复杂,空间分布越来越广,对系统控制性能的要求也越来越高。控制系统已由封闭集中体系逐渐向开放分布式体系发展。集中式控制系统和集散式控制系统都有一些共同的缺点,即随着现场设备的增加,系统的布线十分复杂,成本大大提高,抗干扰性较差、灵活性不够、扩展不方便等。为了从根本上解决这些问题,必须采用分布式控制系统来取代独立控制系统。分布式控制系统就是将控制功能下放到现场节点,不需要一个中央控制单元来集中控制和操作,通过智能现场设备来完成控制和通信任务。将计算机网络系统应用于控制系统中代替传统的点对点式的连线,使得众多的传感器、执行器和控制器等系统的主要功能部件通过网络相连接,相关的信号和数据通过通信网络进行传输和交换。避免了彼此间专线的敷设,可以有效减少系统的重量和体积;方便系统的安装与维护,提高系统的诊断能力;并且可以实现资源共享、远程操作和控制。这种传感器、控制器、执行器等通过实时网络构成的闭环反馈控制系统称为网络控制系统,是计算机网络技术、通信技术、传感器技术和控制科学日益发展与交叉融合的产物,是计算机网络技术在控制领域的延伸和应用,是计算机控制系统的更高发展。

关于网络控制系统的研究可以追溯到 20 世纪中后期, Ray 等^[1-3]对集成通信控制系统(integrated communication and control systems, ICCS)做了大量的早期研究工作, ICCS 可以看作是现代网络控制系统的雏形。网络控制系统(networked control systems, NCS)最早出现于马里兰大学 Walsh 等^[4]的论著中,当时只是用图示方法说明了网络控制系统的结构,但未给出明确的定义。清华大学的顾洪军等^[5]给出了如下的定义:利用通信网络实现地域上分布的现场传感器、控制器及执行器之间的信息相互交换,以达到被控对象的实时反馈控制,这样的一类控制系统称为网络控制系统。网络控制系统是在通信网络上建立的闭环控制回路,包含狭义的网络控制系统和广义的网络控

制系统。基于工业以太网和现场总线技术的网络控制系统都可以看成是一种狭义的网络控制系统。广义的网络控制系统不但包括狭义的网络控制系统,还包括通过 Internet、无线网络、企业信息网络及企业内部网络,实现对工厂车间、生产线及工程现场设备的远程控制、信息传输、信息管理及信息分析等。网络控制系统最主要的结构特点是系统的反馈通过网络构成闭环,其一般结构如图 1.1 所示。

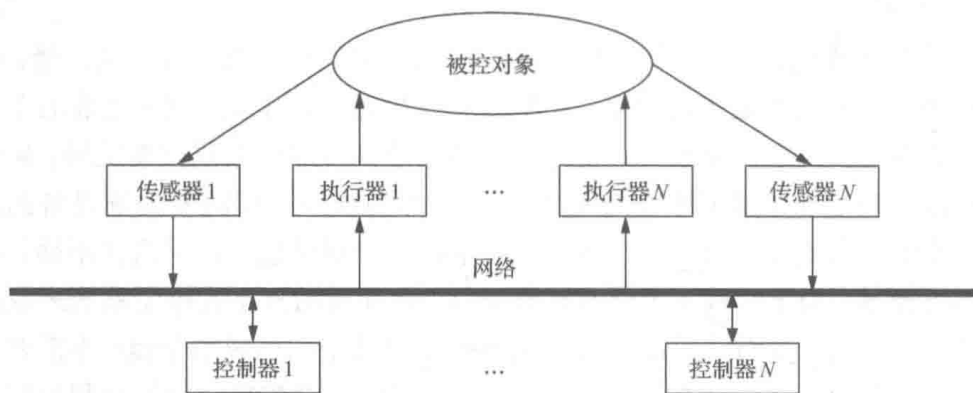


图 1.1 网络控制系统的一般结构

目前,网络控制系统通常有两种理解:①网络的控制(control of network),指对网络路由、网络数据流量等的调度与控制^[6],这是对网络自身的控制,可以利用运筹学和控制理论等方法来实现;②基于网络的控制(control over network),指控制系统各节点(传感器、控制器和执行器)之间的数据通过网络来传输,系统为分布式控制系统,可以通过建立其数学模型用控制理论等方法进行研究^[7-11]。这两种系统都离不开控制和网络,只是侧重点不同。近 10 年来,网络控制问题受到了国际控制理论界和计算机科学界的广泛关注。目前,很多复杂的控制系统如无线网络机器人、运输工具、远程遥控操作、基于 Internet 的远程教学和实验、远程医疗、制造业设备、兵器系统,以及现场总线(Fieldbus)和工业以太网(Industrial Ethernet)技术等^[12-16],本质上都可归结为基于网络的控制系统。此外,网络控制系统在航空航天领域及复杂、危险的工业控制领域也具有广阔的应用前景。随着 NCS 在工业对象中的广泛应用,NCS 已经成为国际控制理论界的一个学术热点问题。IEEE、IFAC 和 Automatica 等刊物相继出版了网络控制系统研究方面的专刊。国内的《自动化学报》等期刊和重要的学术会议也有大量网络控制方面的研究报告^[17-21]。国内关于网络控制系统方面的专著也很多^[22-28]。

对 NCS 的研究涉及控制论、计算机科学、信息论、机械电子工程、软件工程、可靠性理论等多个学科领域。控制论、计算机科学和信息论是系统分析的理论基础。机械电子工程、软件工程和可靠性理论在工程现实中为设计方法提供指导。网络控制系统综合了数字通信技术、计算机技术、自动控制技术、网络通信技术和智能仪表等多种技术手段,从根本上突破了传统的“点对点”式信号控制的局限性,构成了一种全分散、全数字化、智能、双向、互连、多变量、多接点通信与控制的实时反馈控制系统。网络控制系统是一个跨越多个学科的研究领域,其分析与设计不仅涉及控制理论中离散、连续及混合等分析方法和控制技术,还要考虑通信网络中的信息传输技术。NCS 的性能不仅依赖于控制算法,还依赖于对网络资源的调度。网络控制系统的研究目标为:①设计和使用通信协议以保证通信网络的服务质量;②设计先进的控制器以满足系统的性能指标。因此,网络控制系统的研究既复杂又富含挑战性。

1.2 网络控制系统无限时间控制研究现状

网络控制系统是通信网络和控制系统的有机结合,对网络控制系统的研究包括控制和通信网络两个方面,所以研究网络控制系统的时延、丢包等问题也可以从两个不同角度进行。从控制角度出发,基本思想是将网络协议、拓扑结构、信道负载和网络时延等作为已知条件,将网络控制系统看作带有时延、丢包等的复杂控制系统进行分析并设计相适应的控制器,保证系统良好的控制性能和稳定性。从通信网络角度出发,基本思想是从拓扑结构、任务调度算法和介质访问控制层协议等方面提出解决方案,满足系统对实时性的要求,同时减小网络时延和丢包及它们的不确定性。另外,还可以将两种结合起来进行分析,从而解决网络控制系统的时延等问题。本书主要从控制理论角度来研究网络控制系统。从控制理论角度出发,网络控制系统又从各个不同侧重点得到了广泛的研究,例如,以传输时延为主要矛盾的时延网络控制系统,以数据包丢失为主要矛盾的丢包网络控制系统等。

1.2.1 时延网络控制系统的分析与综合

对于不同的网络控制系统,其建模方法也不尽相同,各种建模方法都有其优缺点。网络控制系统的建模方法主要取决于网络传输特性和网络节点的

工作方式。一旦建立了网络控制系统的模型,其控制器设计方法也就取决于具体的模型。国内外很多学者在网络控制系统的建模方面已经做了深入的研究,针对不同的网络传输特性和网络控制策略,网络控制系统的建模及控制方法大体有以下几类。

1. 基于确定性系统的建模与控制

在 Luck 等^[29-31]的研究中,传感器节点、控制器节点和执行器节点都采用时间驱动方式,通过时钟同步方式,网络中所有节点都是等周期同步采样。然后分别在控制器节点和执行器节点的接收端设置消息缓冲(message buffers),并保证各自的缓冲长度比相应的网络延时要大。通过采用缓冲的方法,将基于网络的闭环控制系统变成为一个线性时不变离散控制系统,使得网络控制系统的设计问题转化为一般的数据采样控制问题;然后基于线性二次高斯(linear quadratic Gaussian, LQG)方法来设计网络控制系统的最优控制器。这种确定性系统设计方法的优点是,对于网络时延长于一个采样周期的情况也能够适用,能够应用已有的线性系统理论来设计网络控制系统;缺点是,由于网络节点以时间驱动方式工作,人为地增加了网络延时,并且在网络中还要实现各网络节点的时钟同步,增加了系统设计的难度。文献[32]在考虑了网络控制系统噪声的情况下,利用与文献[29]类似的方法设计了网络控制系统的多步时延补偿器。文献[33]利用文献[29]提出的网络控制系统的确定性模型,设计了网络控制系统的状态观测器。

2. 基于离散切换系统的建模与控制

Krotolica 等^[34]和 Xiao 等^[35]以离散系统方法研究网络控制系统,由于没有采用文献[29]中的排队缓冲策略,网络节点以时间驱动方式工作,因此网络延时为采样周期 T 的整数倍;并且,还假定网络时延满足 $\tau(k) \in (T, \dots, mT)$,且具有 Markov 随机分布特性。采用这种离散跳变线性系统的建模及控制方法,其优点是对于时滞长于一个采样周期的网络控制系统特别适用,由于摒弃了排队缓冲策略,消除了网络延时中的等待延时。但是,文献[34]所设计的控制器仅依赖于从传感器到控制器的时延。文献[36]考虑了同时依赖于传感器到控制器时延及控制器到执行器时延的状态反馈控制器。文献[37]考虑了同时依赖于传感器到控制器时延及控制器到执行器时延的输出反馈控制器。

3. 基于变采样周期的网络化控制系统的建模与控制

在 Walsh 等^[38-39]的研究中,为了消除控制器和执行器采用时间驱动方式带来的人为时滞,控制器节点和执行器节点采用事件驱动方式。并且假定网络传输速度足够快,采样时间和网络规划时间可以忽略不计,认为网络通信中只存在由节点竞争而导致的节点访问延时,反馈信息的延时可以忽略不计。引入了最大允许传递间隔(maximum allowable transfer interval, MATI)的概念,并在此基础上提出了保证系统稳定的网络传输调度算法:基于 Token-Ring 的静态节点规划和基于网络节点规划(try once discard, TOD)的动态规划算法。TOD 是指每个网络智能节点将当前数据值和上次传送的数据值进行比较,并计算权误差值,具有最大权误差值的节点具有网络的使用权,以尽可能地减小网络负载。然后基于 Bellman-Gronwall 不等式和误差摄动理论,分别得出了对于单包传输和多包传输条件下,网络控制系统指数稳定的充分条件。Bellman-Gronwall 不等式的保守性使得所得的结论非常保守,难以用于实际工程设计。Zhang 等^[40-41]采用类似的建模方法将这类网络控制建模为变采样周期控制系统(时变离散系统);为了减小结论的保守性,其将网络对控制系统的影响视为系统扰动,基于误差摄动理论得出了保守性较小的稳定性定理。文献[42]~[45]基于 Lyapunov 理论和 L_p 稳定性理论得出一些相关的稳定性结果。

4. 基于随机控制理论的网络控制系统的建模与控制

对于具有随机干扰的网络控制系统,Nilsson 等^[46-49]基于随机最优控制理论来研究。Nilsson 主要研究的是时滞 τ 小于采样周期 T 的情况,将网络控制系统转化为 LQG 问题然后基于随机控制理论求解网络控制系统的最优控制器。Hu 等^[50]进一步研究了时滞 τ 大于采样周期 T 的情况,并分别针对全部状态反馈和部分状态反馈给出使得系统指数均方稳定的控制器设计。

5. 基于模型参考的网络控制系统的建模与控制

Montestruque 等^[51-53]基于对象模型研究网络控制系统,目的是通过使用对象模型信息减少网络通信负载以提高网络传输的实时性,以连续对象控制器为研究对象,仅考虑在传感器和控制器间存在网络通信的一类网络控制系统。此外,还进一步研究了输出反馈控制问题,以及网络时滞不可忽略时的

控制问题,并取得了一些重要的成果。

6. 基于鲁棒控制理论的网络控制系统建模及控制

Goktas 等^[54]基于频域理论设计了网络控制系统的鲁棒控制器,从控制器到执行器的时延 τ^{ca} 和从传感器到控制器的时延 τ^{sc} 可以被看成是同步施加的倍乘扰动。从而将不定延时问题化为标准的 H_∞ 控制器设计问题。于之训等^[55]将鲁棒控制中的 H_∞ 和 μ 综合方法引入了控制器的设计,然后针对转化后的系统设计了鲁棒控制器,设计出的控制器对在一定范围内变化的时延都能保持稳定。鲁棒控制理论是针对实际工程中模型不确定性发展起来的,因此将网络控制系统作为不确定性系统问题可以尝试应用鲁棒控制器的设计方法来解决,其优点在于不需要有关时延分布特性的先验知识。该法关键是要将时延环节转化为系统的一个不确定块,同时考虑被控对象本身的不确定性,然后针对转化后的系统设计鲁棒控制器,这样设计出的控制器能同时保证网络控制系统的鲁棒稳定性和鲁棒性能指标,该性能指标是确定性的性能指标,而不是概率意义上的性能指标。文献[56]、[57]讨论了时延网络控制系统的 H_2/H_∞ 混合控制问题。

7. 时延网络控制系统的其他研究方法

以上介绍的时延网络控制系统的研究方法是几种典型的研究方法,在国内还有很多其他的研究方法。如邱占芝等^[58]对基于广义系统的网络控制系统进行研究,熊远生等^[59]采用滑模预估控制方法的网络控制方法,黄剑^[60]采用脉冲控制方法对网络控制系统进行研究,田仲等^[61]基于预测控制方法对网络化控制系统进行研究等。

1.2.2 丢包网络控制系统的分析与综合

数据包丢失是引起网络控制系统性能下降、失稳的重要原因。丢包主要可以分为两种:一种是被动丢包,它是由网络链路故障及传输错误等因素造成的;另一种是主动丢包,如传输节点在高负载时为了使网络控制系统能够正常运行或者为了保证控制系统仍然具有期望的性能而主动地丢弃一些数据包等。目前对网络控制系统的传输延时问题的研究取得了一系列的成果,与此同时,越来越多的专家学者关注、研究数据包丢失问题,并取得了令人瞩目的成果。主要代表性控制策略和方法如下。

1. 丢包网络控制的切换控制策略

由于网络的存在,网络控制系统将依赖于数据包的传输和接收,系统的输入也将随着每个数据包的到达而改变或切换,一些研究者将网络控制系统中的数据包丢失问题简化为一类切换问题来研究。切换系统的稳定性问题的研究成果为网络控制系统的研究提供了一定的理论基础^[62-64]。文献[65]、[66]将丢包过程建模成一个任意的有限切换的信号,并将切换系统的相关结论应用到网络控制系统的稳定性研究中。文献[40]针对网络传输丢包和多包发送的情况,将丢包网络控制系统建模成一个有事件率约束的异步动态系统,应用异步动态系统理论分析了丢包网络控制系统指数稳定性问题。这类异步动态系统模型可以看成一种特殊的切换系统模型。不足之处在于仅仅考虑了在传感器和控制器之间存在网络连接的情况。针对这一点,文献[67]建立了双边网络闭环控制系统模型,提出了保证系统指数稳定性的信号传输成功率的范围,解决了在保证系统稳定前提下允许多大程度数据包丢失的问题,并进一步提出了判定网络控制系统指数稳定性的充分条件。但以上文献只考虑了系统为状态反馈的情况,为此,文献[68]利用异步动态理论对具有输出反馈的网络控制系统进行了稳定性分析。然而仅仅分析系统的稳定性是不够的,还要考虑如何设计控制器来保证系统在丢包情况下的性能。文献[69]~[71]在这一方面作了相关的研究,Qiang等将功率谱密度引入到网络控制系统中,将丢包率作为衡量服务质量(quality of service, QoS)的一项性能指标,提供了一种通过系统的输出功率谱范数来直接联系网络控制系统的丢包率和网络控制系统的性能的方法,所建立的系统模型,其实质是一个切换系统。文献[72]研究了线性不确定系统的开关逻辑控制和稳定性,构造了与传输策略有关的控制器结构,考虑控制器无法获得传感器数据的最大时间间隔,文中分别设计了传输、周期性传输和随机传输等三种不同策略下的控制器和观测器。

2. 丢包网络控制的随机控制策略

文献[35]对传感器和控制器、控制器和执行器之间通信链路上存在随机时延和报文丢失的网络控制系统进行了研究。文中考虑的是离散被控对象,控制率是 Markov 模式依赖的状态反馈控制器,通过增广系统状态,闭环的网络控制系统具有状态反馈控制的结构,将随机时延系统建模成具有转移概率的 Markov 链,该模型兼顾了网络时延和丢包,通过将系统建模成 Markov

跳变系统,并应用 V-K 迭代的方法设计了开关型和非开关型控制器。文献[73]假定所有的传感器、执行器和控制器都通过通信网络连接在一起,仅仅考虑由网络拥塞策略带来的网络丢包对系统稳定性的影响,将研究问题归结在 LQG 框架下进行了讨论,并指出分离定理在此不再成立。同时采用了不确定域值原则和次优的方法简化了控制器和估计器的计算,将其转化为一个类 Riccati 方程的求解问题。文献[74]组合讨论控制输入信息和传感器输出信息是否存在丢包,将无干扰的网络控制系统转化为 Markov 跳变系统,最后将系统的均方稳定性条件归结为一系列线性矩阵不等式的可行解问题。

3. 丢包网络控制的鲁棒控制策略

实际系统中有许多不确定因素,不确定系统的鲁棒控制理论在处理模型不确定性、外部干扰信号不确定领域的复杂控制问题方面取得了成功。在网络控制系统的鲁棒控制特别是针对丢包问题的研究方面,目前成果有限。文献[75]兼顾了不确定网络时延和丢包的情况,将网络控制系统建模成一类线性离散切换系统,利用已有的线性离散切换系统的相关理论和分段 Lyapunov 方程,提出了网络控制系统的鲁棒稳定性和扰动衰减性分析。文献[76]将可能存在输出丢包的网络控制系统建模成 Markov 跳变系统,分析了系统的稳定条件,研究了系统的 H_∞ 控制问题。文献[77]研究了通信约束下网络控制系统的最优 H_∞ 控制问题,给出了 H_∞ 性能与通信序列之间的寻优算法。

1.2.3 面向复杂环境的网络控制系统优化控制

在复杂的网络环境下,网络控制系统还存在许多问题有待于研究,包括同时受到时延和丢包的影响的网络控制系统研究、多输入多输出网络控制系统的研究、非线性网络控制系统的研究等。目前对这些问题的研究也取得了一些初步成果。

1. 同时受时延和丢包干扰的网络控制系统的研究

基于迭代方法,文献[66]、[67]将任意丢包和定常时延网络控制系统建模为一个切换系统,运用切换系统理论和线性矩阵不等式方法给出系统的稳定性分析和控制器设计。基于切换系统的方法,文献[78]讨论了同时受丢包和时变时延影响的网络控制系统的稳定性和持续干扰的衰减性,但要求时延小于一个采样周期。文献[79]讨论了同时受丢包和时延大于一个采样周期影