



王玉龙 Qing-Long Han 费敏锐 著

网络控制系统的 优化设计



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

网络控制系统的优化设计

王玉龙 Qing-Long Han 费敏锐 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

网络控制系统具有重要的应用价值,已成为近年来研究的热点之一。本书首先阐述了网络控制系统的国内外研究现状与发展趋势、存在的问题和不足;然后以网络控制系统的 H_∞ 性能优化控制器设计为主线,对变采样周期网络控制系统的 H_∞ 控制与故障检测问题进行讨论,提出了时延切换方法、时延切换与参数不确定性相结合的方法来处理网络诱导时延,给出了网络控制系统的丢包补偿方案,分析了网络控制系统的输出跟踪控制器设计问题,探讨了数据漂移对网络控制系统性能的影响;最后对网络控制系统有待进一步研究的问题进行展望。

本书可作为高等学校控制理论与控制工程、计算机科学与技术等专业研究生和高年级本科生的教材与参考用书,也可供网络控制系统相关领域的科研工作者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

网络控制系统的优化设计/王玉龙, (澳)韩清龙(Qing-Long Han), 费敏锐著.
—北京: 科学出版社, 2019.11

ISBN 978-7-03-062794-0

I. ①网… II. ①王… ②韩… ③费… III. ①计算机网络-控制系统设计
IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 235644 号

责任编辑: 朱英彪 赵晓廷 / 责任校对: 王萌萌
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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 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 B5

2019 年 11 月第一次印刷 印张: 14 1/2

字数: 292 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

网络控制系统是通过网络连接传感器、控制器和执行器而形成的闭环系统。计算机网络相比于传统控制系统中的点对点结构具有诸多优点,例如,可以实现资源共享,具有较高的容错与故障诊断能力,以及较高的系统灵活性等。网络控制系统的提出具有很强的工程背景,促使这一研究方向迅速发展的重要动力来源于工业控制及军事领域,如石油化工、冶金等连续流程工业的生产控制和调度,以及现代飞机、汽车及巡航导弹中基于计算机和其他复杂信息处理装置的决策控制操作和实时控制等。近十几年来,国内外很多高校和科研院所成立了网络控制系统方向的研究团队,涌现了大量的关于网络控制系统方面的学术成果。但是,目前仍有一些具有较高价值的问题需要开展研究,如变采样周期网络控制系统的控制、网络丢包补偿、网络控制系统跟踪控制和数据漂移等。

本书作者多年来从事网络控制系统方面的研究工作,本书是对相关成果的总结。本书共 10 章。第 1 章介绍网络控制系统研究的现状和热点问题。第 2 章介绍本书用到的一些预备知识。第 3 章讨论变采样周期网络控制系统的 H_∞ 控制与故障检测问题,并提出一种主动变采样周期方法,以实现系统性能优化和网络带宽资源的充分利用。第 4 章提出时延切换方法及时延切换与参数不确定性相结合的方法,用来处理网络控制系统中的随机时延问题。第 5 章采用预测控制与基于线性估计的方法来补偿时延及丢包的负面影响,并讨论线性时不变系统的 H_∞ 性能分析和状态反馈控制器设计问题。第 6 章提出一种基于多信道共享的方法来补偿时延及丢包的负面影响,并给出线性时不变系统的 H_∞ 性能优化及控制器设计方案。第 7 章讨论常数及时变采样周期网络控制系统的输出跟踪控制问题。通过引入基于信道利用的切换控制器,第 8 章提出具有有限信道及数据漂移的离散时间网络控制系统建模及控制器设计方法。在同时考虑传感器-控制器及控制器-执行器网络诱导时延和丢包的情况下,第 9 章讨论连续时间网络控制系统的建模和基于观测器的 H_∞ 控制器设计问题。第 10 章对于本书的写作过程以及书中涉及领域的后续研究方向进行说明。

本书的出版得到了国家科学技术学术著作出版基金、国家自然科学基金(61633016, 61873335, 61833011)、上海高校特聘教授(东方学者)项目、高等学校学科创新引智计划(D18003)等的资助。参加本书编写整理工作的有博士研究生刘兆清,以及硕士研究生陈丽丽、和红磊、刘庸正等;在本书编写过程中,得到了东北大学杨光红教授、上海大学彭晨教授、澳大利亚斯威本科技大学张先明博士等相关学

者的指导和帮助,同时也参考了大量国内外学者的相关研究成果,在此表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2019年4月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 网络控制系统的研究现状	2
1.2.1 时延及丢包	2
1.2.2 最优控制	4
1.2.3 通信受限	4
1.2.4 容错与故障检测	5
1.2.5 预测控制	5
1.2.6 跟踪控制	6
1.2.7 变采样周期	6
1.2.8 其他典型问题	7
1.3 网络控制系统研究的热点问题	8
1.4 本书主要内容	11
1.5 本章小结	14
参考文献	14
第 2 章 预备知识	25
2.1 网络控制系统 H_∞ 性能指标	25
2.2 主要引理	26
2.3 本章小结	27
参考文献	27
第 3 章 变采样周期网络控制系统 H_∞ 控制	28
3.1 引言	28
3.2 长时延多丢包被动时变采样周期网络控制系统设计	28
3.2.1 问题描述	29
3.2.2 时变采样周期网络控制系统 H_∞ 控制器设计	30
3.2.3 数值算例	39
3.3 被动时变采样周期网络控制系统综合	41
3.3.1 问题描述	42
3.3.2 H_∞ 性能优化与控制器设计	43

3.3.3	数值算例	53
3.4	主动时变采样周期网络控制系统设计	55
3.4.1	问题描述	56
3.4.2	无丢包补偿系统的 H_∞ 控制器设计	58
3.4.3	具有丢包补偿系统的 H_∞ 控制器设计	62
3.4.4	数值算例	65
3.5	主动变采样网络控制系统故障检测滤波器设计	67
3.5.1	基于主动变采样的网络控制系统建模	69
3.5.2	故障检测滤波器设计	71
3.5.3	数值算例	77
3.6	本章小结	80
	参考文献	81
第 4 章	随机时延网络控制系统的性能优化	85
4.1	引言	85
4.2	基于时延切换的网络控制系统设计	85
4.2.1	问题描述	85
4.2.2	基于时延切换的 H_∞ 性能优化与控制器设计	87
4.2.3	基于参数不确定性的 H_∞ 控制器设计	89
4.2.4	数值算例	92
4.3	时延切换与参数不确定性相结合的网络控制系统设计	93
4.3.1	问题描述	93
4.3.2	时延切换与参数不确定性相结合的 H_∞ 控制器设计	97
4.3.3	数值算例	107
4.4	本章小结	110
	参考文献	110
第 5 章	基于预测及线性估计的丢包补偿	113
5.1	引言	113
5.2	基于预测控制的时延及丢包补偿	114
5.2.1	问题描述	114
5.2.2	状态反馈网络控制系统的 H_∞ 控制器设计	116
5.2.3	基于观测器的 H_∞ 控制器设计	120
5.2.4	数值算例	123
5.3	基于线性估计的时延及丢包补偿	125
5.3.1	问题描述	125
5.3.2	基于时延切换的 H_∞ 控制器设计	128

5.3.3 时延切换与参数不确定性相结合的 H_∞ 控制器设计	131
5.3.4 数值算例	136
5.4 本章小结	137
参考文献	138
第 6 章 基于信道共享的丢包补偿	140
6.1 引言	140
6.2 问题描述	140
6.3 网络控制系统 H_∞ 性能分析及控制器设计	142
6.3.1 多共享信道网络控制系统	142
6.3.2 单信道网络控制系统	151
6.4 数值算例	153
6.5 本章小结	155
参考文献	155
第 7 章 网络控制系统的输出跟踪控制	156
7.1 引言	156
7.2 问题描述	156
7.2.1 常数采样周期网络控制系统扩展闭环模型	157
7.2.2 时变采样周期网络控制系统扩展闭环模型	158
7.3 H_∞ 输出跟踪性能分析及控制器设计	160
7.3.1 常数采样周期网络控制系统	160
7.3.2 时变采样周期网络控制系统	169
7.4 数值算例	171
7.5 本章小结	175
参考文献	175
第 8 章 有限信道及数据漂移网络控制系统控制器设计	177
8.1 引言	177
8.2 离散时间网络控制系统建模	178
8.3 H_∞ 性能分析	183
8.4 控制器设计	192
8.5 数值算例	196
8.6 本章小结	199
参考文献	199
第 9 章 基于观测器的建模与控制器设计	202
9.1 引言	202
9.2 基于观测器的连续时间网络控制系统建模	203

9.3 基于观测器的控制器设计	208
9.4 对现有结果的改进	214
9.5 数值算例	215
9.6 本章小结	217
参考文献	218
第 10 章 结论与展望	221

第1章 绪 论

1.1 引 言

随着计算机网络的广泛应用和网络技术的不断发展,传统的控制系统正在发生着深刻的变化。使用计算机网络代替传统控制系统中的点对点结构,实现传感器、控制器与执行器之间的互联,具有重要的应用价值。在这样的控制系统中,检测和控制等各种信号均可通过数据进行传输,而估计、控制和诊断等功能也可以在不同的网络节点中分布执行。通过网络连接传感器、控制器与执行器而形成的闭环系统称为网络控制系统 (networked control systems, NCS)^[1-5]。

与传统的点对点结构的控制系统相比,网络控制系统具有可以实现资源共享、容错与故障诊断能力较强、安装与维护简单、能有效减少系统的体积、可增加系统的灵活性和可靠性等优点。网络控制系统的提出具有很强的工程背景,其本质上是控制技术、网络通信技术和计算机技术相结合的产物,目的是提高控制系统的灵活性和可靠性,而促使这一研究方向迅速发展的重要动力来源于工业控制及军事领域,如石油化工、冶金等连续流程工业的生产控制和调度、大城市交通系统的实时指挥和控制,以及现代飞机、汽车及巡航导弹中基于计算机和其他复杂信息处理装置的决策控制操作和实时控制等,正是这些实际工程问题和军事问题,使得网络控制系统的研究成为目前国际学术界的研究热点之一。一个典型的网络控制系统的结构如图 1.1 所示。

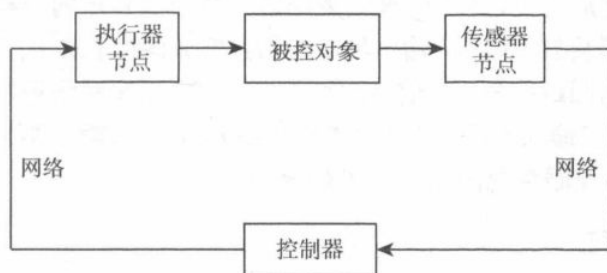


图 1.1 网络控制系统结构

网络控制系统虽然有诸多优点,但是网络的引入也给系统分析与设计带来新的挑战。网络控制系统面临的主要挑战如下。

(1) 在网络化系统下,多用户共享通信通道(简称为信道),必然会导致网络诱

导时延(时间滞后),且该时延一般情况下都是随机时变的。

(2) 网络中不可避免地存在网络拥塞和连接中断,这会导致发生数据包丢失的现象。

(3) 数据流可以经过不同信道传到控制器及执行器,而不同信道的时延不同,会导致数据包时序错乱。

(4) 计算机负载的变化、非周期性故障等会导致传感器的采样周期发生抖动。

(5) 由于受到网络带宽和数据包大小的限制,一个相对较大的数据包可能被分成若干相对较小的数据包,分别进行传输,而多包传输问题使网络控制系统的设计更加困难。

(6) 受网络通信限制的影响,控制输入可能只有部分分量能传到执行器,这样会降低系统的性能。

(7) 连续时间信号在通过通信网络传输之前需要进行采样。一般而言,可采用时间触发的采样和事件触发的采样两种方式,且不同的采样周期长度会影响系统性能和网络利用率。

要使网络控制系统达到稳态且具有良好的动态性能,必须合理解决以上问题。因此,通过合理的控制器设计,实现对网络控制系统性能的优化是非常必要的。本书对网络控制系统中存在的一些问题做了深入探讨,具有重要的理论意义和一定的应用价值。

1.2 网络控制系统的研究现状

近年来,网络控制系统的研究取得了一系列比较系统的成果,主要包括具有时延及丢包的网络控制系统的稳定性分析、控制器设计,网络控制系统的最优控制,基于预测控制的时延及丢包补偿,通信受限的网络控制系统的分析与设计,网络控制系统的容错控制及故障检测,输出反馈网络控制系统的稳定化及控制器设计,网络控制系统的输出跟踪控制,多信道网络控制系统,无线网络控制系统,变采样周期网络控制系统,多输入多输出的网络控制系统及多包传输,网络控制系统的保性能控制,以及网络控制系统的调度与量化等。

1.2.1 时延及丢包

具有时延及丢包的网络控制系统的稳定性分析与控制器设计是控制领域的研究热点,很多学者在该领域取得了一系列丰硕的研究成果^[6-21]。Du等^[6]和Zhang等^[7]分别将网络诱导时延建模为区间时变时延和转换概率部分已知的马尔可夫链。Zhang等^[8,9]研究了网络环境下海洋平台的控制问题。网络控制系统的最大允许传输间隔(maximum admissible transfer intervals, MATI)问题越来越受到学者

的关注^[10-12]。Carnevale等^[12]通过理论证明改进了现有文献中的结果。通过把传感器-控制器及控制器-执行器时延建模为两个马尔可夫链,Zhang等^[13]研究了随机时延离散网络控制系统的稳定化问题,且给出了能使系统稳定的控制器存在的条件。Xie等^[14]和Pan等^[15]利用基于线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)的方法讨论了时变网络时延系统的稳定化问题。通过把时变时延看作时变参数不确定性,Xie等^[14]给出了保证系统稳定性的充分条件且设计了系统的控制器。Pan等^[15]通过把时变时延分解为固定部分(固定部分大小为采样周期的整数倍)和时变部分(时变部分长度小于一个采样周期),给出了静态控制器的设计方法,该方法可以推广到时变时延长度大于一个采样周期的情况。Xie等^[14]和Pan等^[15]在处理时变时延时采用了参数不确定性的方法,该方法可以简化系统分析,但是得到的结果保守性比较大。时延网络控制系统的 H_∞ 性能分析及控制器设计问题也引起了学者的研究兴趣^[16-20]。通过定义合适的李雅普诺夫(Lyapunov)泛函并采用自由加权矩阵方法,Yue等^[18]得到了比Kim等^[10]研究结果更好的最大允许传输间隔。在网络控制系统的时延估计和补偿方面,也取得了一些有价值的成果^[21]。Diouri等^[21]在考虑控制质量的情况下优化网络调度机制,并为非受限的帧分配最大的带宽。

以上研究主要考虑了网络诱导时延,由于网络中不可避免地存在网络拥塞、传输超时、传输错误和连接中断等现象,所以数据包丢失在所难免。具有数据包丢失的网络控制系统的稳定化及控制器设计等问题引起了学者的广泛关注^[22-34]。Cloosterman等^[22]在离散时间域内将丢包与网络诱导时延建模为时变时延。Yu等^[23]基于切换系统方法研究了具有丢包的系统稳定化问题。通过把具有时延及丢包的神经网络控制系统建模为具有输入时延的一般线性系统,Yu等^[24]研究了连续及离散神经网络控制系统的状态反馈控制器设计问题,类似的结果见文献^{[25]~文献[28]}。Rivera等^[29]讨论了时延及丢包所带来的不确定性对神经网络控制系统的影响,且给出了保证系统稳定性的充分条件。Wu等^[30]给出了单包及多包传输神经网络控制系统的模型,同时把传感器-控制器及控制器-执行器丢包行为描述成不同的相互独立的马尔可夫链,基于所得到的模型给出了保证系统随机稳定的充分条件并设计了系统的控制律。Yue等^[31]给出了同时存在网络时延及丢包的神经网络控制系统的新模型,并基于该模型得到了容许的网络时延的新上界。由于没有忽略Lyapunov-Krasovskii函数中的任何导数项,He等^[32]得到了比文献^[18]和文献^[31]中结果更好的最大容许时延。通过选择适当的采样周期以减少数据传输,引入合理的调度以使丢包数降到最低,并提出优化控制器设计等方法,Wen等^[33]给出了优化控制系统性能的方法。通过把丢包行为建模成独立同分布的伯努利(Bernoulli)过程,Hu等^[34]给出了具有丢包的离散时间神经网络控制系统稳定的条件。

在工业过程控制系统中,当物质和能量沿着一条特定的路径传输时就会出现

时延,它是作为物理系统的一个固有特性而存在的,特别是纯粹的时延经常被用来理想地描述传递、转送过程中的滞后现象和惯性作用所导致的滞后现象。时延现象在许多控制系统中是普遍存在的,如航空、航天、生物、生态、经济以及各种工程系统。实践已经证明,在各类系统中时延的存在常常是造成系统不稳定的主要原因。由于其广泛的应用背景,时延系统的研究得到了许多学者的关注^[35-45]。事实上,丢包可以看作时延的一种特殊形式,而现有文献中关于一般时延系统的方法可以用来处理时延网络控制系统的稳定性分析及控制器设计问题。时延及丢包会降低系统性能甚至引起系统不稳定,因此关于该问题的研究得到了迅猛的发展,成为当前网络控制系统研究的热点之一。

1.2.2 最优控制

在网络控制系统的最优控制方面,也取得了较大进展^[46-52]。Hu等^[46]研究了在网络诱导时延大于一个采样周期的情况下系统的随机最优控制器及最优状态估计器的设计问题。Sinopoli等^[47]在离散时间域上研究了线性高斯二次型(linear Gaussian quadratic)最优控制问题,结果表明在存在数据包丢失的情况下,分离定理依然适用,类似的结果见文献^[48]。Rotkowitz等^[49]所研究的系统由多个子系统构成,每个子系统都有其各自的控制器,且每个子系统的动态都可以影响其他子系统的动态,控制器之间也可以相互通信;在一定的条件下,该系统的最优控制问题可以转化为凸优化问题。在网络诱导时延有界、未知、为采样周期长度整数倍的情况下,Dritsas等^[50]研究了一类特殊的网络控制系统的受限有限时间最优控制问题。Sahebsara等^[51]研究了多个数据包丢失的网络控制系统的最优 H_2 滤波问题,一个新的表达式被用来建模多个数据包丢失的情况,其中随机丢包率被转化为系统表达式中的随机参数。其他关于网络控制系统最优控制的结果,可参见文献^[52]。

1.2.3 通信受限

在网络控制系统中,网络带宽及每次发送的数据包的大小都是受到限制的,因此研究通信受限的情况下系统的稳定性分析、控制器设计和性能优化等有重要意义^[53-58]。对于有限信道网络控制系统,Guo^[53]研究了动态输出反馈控制器和网络存取序列的协同设计问题。对于由随机事件驱动传感器和执行器网络构成的线性系统,Guo等^[54]研究了稳定性分析和控制器设计问题。Song等^[55]研究了通信受限的离散时间网络控制系统的 H_∞ 滤波问题。Rehbinder等^[56]提出了一种有限资源的最优离线调度方法。Gao等^[57]通过假设系统中存在量化、信号传输时延及丢包,研究了具有信息限制的标称系统的滤波器设计问题,并把研究结果扩展到了不确定系统的情况。Ishii^[58]通过假定控制器周期性地从多个传感器收到数据

且将数据传到多个执行器,研究了具有通信限制和信息丢失的系统的 H_∞ 控制问题。其他关于通信限制和数据率受限的相关成果,详见文献 [59]~文献 [66]。

1.2.4 容错与故障检测

容错控制是提高控制系统可靠性的技术。“容错”原是计算机系统设计技术中的一个概念,是容忍故障的简称。故障检测与诊断是对系统运行的安全性和可靠性提出的较高要求。对于一般控制系统的容错控制,目前已经得到较为成熟的结果 [67-69],对网络控制系统的容错控制及故障检测,也有较多成果 [70-79]。需要说明的是, Li 等 [70]、Sid [71]、Teixeira 等 [72] 和 Arrichiello 等 [73] 未考虑网络诱导时延的影响,而 Dong 等 [74] 考虑的是对象状态时延而非网络诱导时延。与前述文献不同, Wang 等 [75] 和 He 等 [76] 充分考虑了传感器-故障检测滤波器网络诱导时延的影响。网络控制系统的介质存取控制协议可以定义网络中的存取调度和冲突仲裁策略,对于传感器、控制器和执行器由不同的介质存取控制协议连接而构成的网络控制系统, Klinkhieo 等 [77] 研究了其容错控制问题,并利用网络控制系统信息包的概念描述了通过网络来控制某个特定系统的新过程。Mao 等 [78] 把具有传输时延、过程噪声和模型不确定性的网络控制系统建模为多输入多输出的离散时间系统,不仅给出一个故障估计方法来估计系统故障,还基于所估计的故障信息和滑模控制理论设计了系统的容错控制器。利用多速率采样法和扩展状态矩阵法, Mao 等 [79] 把长时延网络控制系统建模为马尔可夫跳变系统,并设计了系统的 H_∞ 故障检测滤波器。

1.2.5 预测控制

网络诱导时延及数据包丢失会降低系统性能甚至引起系统不稳定,因此合理地补偿网络诱导时延及数据包丢失的负面影响具有十分重要的意义。Kim 等 [80] 通过假定系统的前馈通道与反馈通道同时具有时延和丢包,提出一种 p 步提前状态估计算法来克服时延和丢包的负面影响;在时延上界为 p 个采样周期的情况下,所设计的系统可以容许 $p-1$ 个连续的数据包丢失。Yang 等 [81] 给出了一种基于预测控制的时延补偿方法,但是并未考虑控制器设计问题,且无论时延大小如何,系统都将一直用预测控制输入而非实际到达的控制输入,这样可能会导致短时延系统性能的降低(由于预测误差的存在,当时延很小时用实际到达的控制输入可能会使系统有更好的性能)。Lian 等 [82] 提出了基于滑模控制和神经网络数据包时序错乱预测器的控制方案,以镇定非线性网络控制系统。Liu 等 [83] 采用预测控制方法来克服网络时延及丢包对系统的负面影响,通过定义扩展向量,给出了一个闭环系统模型,以及常时延闭环系统稳定的条件;对于具有有界随机时延的闭环系统,研究结果表明如果与该闭环系统相对应的切换系统稳定则该闭环系统也稳定。对于

具有不规则量测信息和时变时延的系统, Sanchis 等^[84]设计了其输出预测器, 并在设计过程中考虑了存在时变时延和外部扰动时预测器的鲁棒性。其他预测控制的成果, 详见文献^[85]~文献^[88]。

1.2.6 跟踪控制

跟踪控制的主要目的是使受控对象的输出尽可能地跟踪给定的参考模型的输出。Qiu 等^[89]研究了随机通信时延双线性切换磁阻机的协同跟踪控制问题。Açıkmeşe 等^[90]为了设计状态反馈控制器以使系统的输出渐近跟踪特定的常数参考信号且所有状态都是有界的, 把最初的问题转换为一个与原系统相关的扩展系统的稳定化问题, 并对特定的不确定/非线性系统, 给出了其控制器设计过程。其他关于跟踪控制方面的相关成果, 见文献^[91]~文献^[95]。网络控制与跟踪控制在实际工业系统中具有较高的应用价值, 因此引起了国内外学者的广泛关注且得到了较多研究成果^[96-99]。Gao 等^[96]考虑了网络控制系统的 H_∞ 模型参考控制问题, 其中所考虑的受控对象和控制器分别是连续和离散的, 利用采样数据方法给出了新的系统模型, 并基于该模型设计了系统的状态反馈控制器; 在设计过程中同时考虑了网络时延的下界和上界, 与不考虑网络时延下界的方法相比, 所得到的结果具有更小的保守性。van de Wouw 等^[97]首先研究了具有不确定的、时变的采样间隔和时延的网络控制系统的跟踪控制问题, 利用了两种建模方法: 其一是离散时间模型, 其二是基于时延脉冲微分方程的模型, 然后给出了跟踪误差动态输入到状态稳定的充分条件。Li 等^[98]研究了有通信限制和外部扰动的网络控制系统鲁棒跟踪控制问题。对于全向传感器网络, Foderaro 等^[99]提出了分布式最优控制方法以实现运动目标的协同跟踪。网络控制系统的跟踪控制将是一个研究热点。

1.2.7 变采样周期

在控制系统中, 人们通常希望传感器的采样周期是固定的^[14, 15, 18, 24, 46]。然而, 计算机负载的变化、非周期性故障等会导致传感器的采样周期发生抖动, 因此系统的采样周期可能会在某一理想数值上下波动, 这里称之为被动时变采样周期。时变采样周期的问题得到了广泛关注^[100-103]。其中, Lozano 等^[100]和 Sala^[101]假定在两个采样时刻之间, 控制输入是常数; Hu 等^[102]所考虑的系统具有时变采样周期且该系统是由连续时间非线性对象互连构成的。对网络控制系统采样模式的研究, 也取得了较大进展^[104-108]。考虑到网络带宽利用率与系统性能密切相关, Colandairaj 等^[104]基于马尔可夫跳变线性系统理论提出一种静态采样策略来调整采样间隔, 可以保证系统在均方意义下的稳定性, 结果表明所提出的采样率调整策略可以改善系统的闭环稳定性; 同时, 当出现网络通道错误或较严重的通道竞争时, 控制设计准则仍能满足。Hu 等^[105]研究了具有时钟驱动的控制器和事件

驱动的保持器的网络控制系统的分析与综合问题,通过定义新的李雅普诺夫泛函且采用一个更加宽松的条件,得到了更小保守性的时延依赖的稳定性结果。通过假设采样周期在一个已知区间内变化,Chen等^[106]研究了具有非周期性采样和时变网络诱导时延的网络控制系统稳定性问题。通过考虑异步非周期性采样、时变时延和量测误差的影响,Xiao等^[107]研究了多个局部互连线性子系统的同时稳定性问题。在时变采样数据控制框架下,Zhang等^[108]研究了网络化欧拉-拉格朗日(Euler-Lagrange)系统的一致性问题。

对具有时变采样周期的网络控制系统,执行器在一个采样周期内收到多个控制输入时系统的稳定性分析及控制器设计问题,有待于深入探讨。

1.2.8 其他典型问题

下面分析其他典型问题的研究现状。

1. 多时变时延

前面文献中所提到的具有时延的系统,一般考虑单个时延的情况,而在实际控制系统中可能存在多个时延^[109-111]。对于具有多个逐点分布式时延的线性系统,Cuvas等^[109]给出了保证系统稳定性的必要条件。通过李雅普诺夫稳定性理论,Li等^[110]研究了时变多时延电力系统的建模和控制器设计问题。Zhou等^[111]研究了具有多个时延的积分时延系统稳定性问题。在网络控制系统中,如果受控对象可以从多个信道接收控制输入,则系统中也可能存在多个时延,本书将对这一问题进行讨论。

2. 输出反馈

以上文献中的结果主要考虑状态反馈系统的分析与设计,对输出反馈系统的研究目前也引起了学者的广泛关注^[112-115]。关于网络控制系统的输出反馈控制问题已有一些成果,见文献^[116]~文献^[118]。对于无法由非延迟模糊静态输出反馈控制器镇定但可由延迟模糊静态输出反馈控制器镇定的Takagi-Sugeno(T-S)模糊系统,Zhang等^[116]研究了其网络化输出跟踪控制问题。针对前馈及反馈通道同时存在随机丢包和时延的网络控制系统,Qiu等^[117]研究了其输出反馈保成本控制问题。Zhang等^[118]所考虑的系统在反馈及前馈通道同时存在丢包,且网络时延小于一个采样周期,利用异步动态系统方法和平均驻留时间方法,给出了闭环网络控制系统指数稳定的充分条件且设计了基于观测器的输出反馈控制器。

3. 单包传输与多包传输

单包传输指网络控制系统中的传感器、控制器的一个待发送数据捆绑在一个数据包中进行发送;而多包传输指传感器、控制器的一个待发送数据被分成多个

数据包进行传输。在网络控制系统中要进行多包传输,一方面是因为单包字节大小的限制;另一方面是因为传感器和执行器通常分布在一个很大的物理空间,要将这些数据放在一个数据包中往往是不可能的。不同的网络适合不同类型的传输,例如,以太网可以传输大批量的数据,因为其一个数据包中最大可以容纳 1500B 的数据,所以适合单包传输方式;而设备网 (devicenet) 的一个数据包中最大可以容纳 8B 的数据,因此其数据常常需要分成多包传输。Yu 等^[25]考虑了传感器-控制器通道存在多包传输的情况,但要求控制器-执行器通道必须是单包传输的,如果控制器-执行器通道也是多包传输的,则 Yu 等的方法不再适用。另外,对多输入多输出控制系统的研究,也取得了一些进展^[119,120]。

4. 网络调度

在网络控制系统中,控制环的性能不仅依赖于控制算法,也依赖于对共享的网络资源的调度。Zhao 等^[121]采用了两种不同的调度算法来调度控制信号的传输,其一是静态速率单调的调度算法,其二是动态反馈调度算法,所设计的调度算法可以保证系统的稳定性。Zhang 等^[122]研究了无线网络控制系统中最优拒绝服务攻击的调度问题。

此外,网络控制系统的保成本控制^[117,123-125]、量化^[126,127]、无线通信技术^[128,129]、模糊网络控制^[130,131]、切换网络控制系统^[132-134]、异步网络^[135]、传感器网络^[136-138]等也得到了学者的广泛关注。本书用到的相关经典技术,可参见文献^[139]~文献^[142]。

1.3 网络控制系统研究的热点问题

网络控制系统是目前国际学术界的研究热点,虽然关于网络控制系统的研究已取得了诸多成果,但是网络控制系统在通过共享网络资源给控制系统带来各种优点的同时,也给系统设计带来新的挑战。由于网络控制系统本身的网络诱导时延、丢包、数据包时序错乱等特点,某些传统的控制技术无法直接应用在网络控制系统中,要研究网络控制系统就必须发展与该系统相适应的控制理论与方法。目前,网络控制系统研究的热点问题有以下方面。

1. 稳定性分析与控制器设计

在网络环境下,多用户共享信道且流量变化不规则,因此当网络控制系统的传感器、控制器和执行器通过网络交换数据时必然会产生网络诱导时延,例如,在调度网络中,当节点在等待令牌或时间槽时会产生网络诱导时延。另外,由于网络中不可避免地会发生网络拥塞和连接中断,所以数据包丢失在所难免。网络诱导时延