



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化 两化融合
研究与应用

网络控制系统的性能 分析与设计

关治洪 黄 剑 著
丁 李 姜晓伟



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

信息化与工业化两化融合研究与应用

网络控制系统的性能分析与设计

关治洪 黄 剑 丁 李 姜晓伟 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

网络无处不在。对网络控制系统进行定性和定量的分析与设计已成为网络时代科学研究和工程应用的重要研究课题。结合作者近年来在网络控制系统(networked control system, NCS)方面的研究成果,本书介绍了基于混杂系统理论的 NCS 分析与设计和 NCS 性能极限分析两部分内容。第一部分分析了 NCS 中的混杂现象,介绍了混杂系统理论的预备知识;给出了基于切换系统和脉冲系统理论描述网络丢包和时滞的建模方法,研究了 NCS 的鲁棒控制、 H_∞ 控制、保成本控制 and 耗散控制设计问题;介绍了基于马尔可夫跳变系统理论的随机 NCS 建模问题,研究了随机切换控制器设计、随机容错控制设计和多率控制设计等问题;提出了网络化脉冲控制系统(networked impulsive control system, NICS)的新概念,在此框架下研究了 NICS 的稳定性分析和控制器设计问题。第二部分介绍了性能极限的定义以及所需的预备数学知识;探讨了脉冲干扰影响下的 NCS 跟踪性能极限问题;研究了高斯噪声影响下的 NCS 跟踪性能极限问题,以及编码器-解码器对网络控制系统最优跟踪性能的影响。

本书可供从事信息与控制类的科研工作者和工程技术人员阅读,也可作为高等院校自动化及其相关专业的教师、高年级本科生和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

网络控制系统的性能分析与设计/关治洪等著. —北京:科学出版社, 2016

(信息化与工业化两化融合研究与应用)

ISBN 978-7-03-045752-3

I. ①网… II. ①关… III. ①互联网络-控制系统-性能分析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(2015)第 225208 号

责任编辑:姚庆爽 / 责任校对:张怡君

责任印制:张 倩 / 封面设计:黄华斌

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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张:13

字数:255 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书编委会

顾问委员会 戴汝为 孙优贤 李衍达 吴启迪 郑南宁 王天然
 吴宏鑫 席裕庚 郭 雷 周 康 王常力 王飞跃

编委会主任 吴 澄 孙优贤

编委会副主任 柴天佑 吴宏鑫 席裕庚 王飞跃 王成红

编委会秘书 张纪峰 卢建刚 姚庆爽

编委会委员 (按姓氏笔画排序)

于海斌 (中国科学院沈阳自动化研究所)	张纪峰 (中科院数学与系统科学研究院)
王 龙 (北京大学)	陈 杰 (北京理工大学)
王化祥 (天津大学)	陈 虹 (吉林大学)
王红卫 (华中科技大学)	范 铠 (上海工业自动化仪表研究院)
王耀南 (湖南大学)	周东华 (清华大学)
卢建刚 (浙江大学)	荣 冈 (浙江大学)
朱群雄 (北京化工大学)	段广仁 (哈尔滨工业大学)
乔 非 (同济大学)	俞 立 (浙江工业大学)
刘 飞 (江南大学)	胥布工 (华南理工大学)
刘德荣 (中国科学院自动化研究所)	桂卫华 (中南大学)
关新平 (上海交通大学)	贾 磊 (山东大学)
许晓鸣 (上海理工大学)	贾英民 (北京航空航天大学)
孙长银 (北京科技大学)	钱 锋 (华东理工大学)
孙彦广 (冶金自动化研究设计院)	徐 昕 (国防科学技术大学)
李少远 (上海交通大学)	唐 涛 (北京交通大学)
吴 敏 (中南大学)	曹建福 (西安交通大学)
邹 云 (南京理工大学)	彭 瑜 (上海工业自动化仪表研究院)
张化光 (东北大学)	薛安克 (杭州电子科技大学)

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书序

传统的工业化道路,在发展生产力的同时付出了过量消耗资源的代价:产业革命 200 多年以来,占全球人口不到 15% 的英国、德国、美国等 40 多个国家相继完成了工业化,在此进程中消耗了全球已探明能源的 70% 和其他矿产资源的 60%。

发达国家是在完成工业化以后实行信息化的,而我国则是在工业化过程中就出现了信息化问题。回顾我国工业化和信息化的发展历程,从中国共产党的十五大提出“改造和提高传统产业,发展新兴产业和高技术产业,推进国民经济信息化”,到党的十六大提出“以信息化带动工业化,以工业化促进信息化”,再到党的十七大明确提出“坚持走中国特色新型工业化道路,大力推进信息化与工业化融合”,充分体现了我国对信息化与工业化关系的认识在不断深化。

工业信息化是“两化融合”的主要内容,它主要包括生产设备、过程、装置、企业的信息化,产品的信息化和产品设计、制造、管理、销售等过程的信息化。其目的是建立起资源节约型产业技术和生产体系,大幅度降低资源消耗;在保持经济高速增长和社会发展过程中,有效地解决发展与生态环境之间的矛盾,积极发展循环经济。这对我国科学技术的发展提出了十分迫切的战略需求,特别是对控制科学与工程学科提出了十分急需的殷切期望。

“两化融合”将是今后一个历史时期里,实现经济发展方式转变和产业结构优化升级的必由之路,也是中国特色新型工业化道路的一个基本特征。为此,中国自动化学会与科学出版社共同策划出版“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书,旨在展示两化融合领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升控制科学与工程学科的学术水平。丛书内容既可以是新的研究方向,也可以是至今仍然活跃的传统方向;既注意横向的共性技术的应用研究,又注意纵向的行业技术的应用研究;既重视“两化融合”的软件技术,也关注相关的硬件技术;特别强调那些有助于将科学技术转化

为生产力以及对国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大专家、学者的积极参与和大力支持,以及丛书编委会的共同努力,本丛书将为繁荣我国“两化融合”的科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

最后,衷心感谢所有关心本丛书并为其出版提供帮助的专家,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助,感谢广大读者对本丛书的厚爱。

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Wang Yifan, the Chinese Academy of Engineering Academician mentioned in the text below.

中国工程院院士

2010年11月

前 言

随着计算机技术与通信技术的飞速发展,计算机网络已渗透到自动控制的各个领域。计算机网络与控制系统相结合,扩大了系统的规模,增加了结构复杂度,形成了集控制、通信、管理、决策等功能于一体的网络控制系统(networked control system, NCS)。一方面,相对于传统控制系统, NCS 具有成本低、维护简单、节点智能化与模块化、易于资源共享、可实现远程操控与诊断等诸多优点;另一方面,网络介入传统控制系统带来了诸如通信时滞、多包传输、带宽约束、数据丢包、时钟异步等一系列新的问题,迫切需要新的控制理论和方法对 NCS 进行分析、设计与综合。

NCS 是目前控制系统发展的主要方向之一,其研究为过去数十年来的持续研究热点。在通信与控制学科相互融合的背景下,国内外针对 NCS 的研究成果丰富,也有不少专著。本书力图另辟蹊径,结合作者及其研究团队在 NCS 领域的研究特色,介绍团队在 NCS 领域的部分研究成果,主要包括两个方面:①基于混杂系统理论的 NCS 分析与设计;②NCS 的跟踪性能分析。这些内容具有以下特点:

(1)本书作者所在研究团队是国内较早应用混杂系统理论对 NCS 进行分析与设计等相关研究的团队之一。本书作者充分运用脉冲切换系统的理论与方法,得到某些条件下 NCS 的切换系统模型与脉冲系统模型的等价性,提出了网络脉冲切换控制系统的新概念,建立了网络脉冲控制系统稳定性等有关基本理论,为进一步应用脉冲切换系统理论研究网络控制系统提供了新的思路。

(2) NCS 的性能分析问题是建立在网络控制系统稳定性研究上的一类新问题,旨在通过研究受网络通信约束的控制系统所能达到的极限性能,揭示网络参量对系统性能的内在约束。本书将以跟踪性能分析为基础,介绍控制系统在受到脉冲干扰、高斯噪声干扰以及编码、解码结构下系统可达的跟踪性能极限问题。通过给出这些问题及其研究方法,构建网络环境下控制系统性能极限研究的框架。

围绕这两部分内容,本书共 9 章。第 1 章介绍了 NCS 的研究现状。第 2 章分析了 NCS 中的混杂现象,阐述了混杂系统的一些基本概念和预备知识。第 3 章结合切换系统理论研究 NCS 建模问题,并在模型基础上探讨了 NCS 的 H_∞ 控制、保成本控制和耗散控制设计方法。第 4 章研究了基于脉冲系统模型的 NCS 鲁棒控制和保成本控制设计问题,并提出了网络化脉冲控制系统(networked impulsive control system, NICS)这一新概念,讨论了 NICS 的稳定性和控制器设计问题。

第5章基于马尔可夫跳变系统理论研究了随机意义下的NCS,在统一的模型框架下探讨了NCS的随机切换控制、随机容错控制与网络带宽受约束时的多率控制设计问题。第6章给出了NCS性能极限的定义以及所需的预备数学知识。第7章探讨了脉冲干扰影响下的NCS跟踪性能极限问题。第8章主要讨论了高斯噪声影响下的NCS跟踪性能极限问题。第9章则研究了编码器-解码器对网络控制系统最优跟踪性能的影响问题。

本书的内容尽管没有涵盖研究团队关于NCS的全部成果,但读者能够通过本书的阅读了解和掌握脉冲、切换等混杂系统理论分析方法与基于频域法的网络控制系统性能极限分析方法,能够在此框架下进一步深入地分析和设计NCS。

本书由华中科技大学关治洪教授、黄剑教授、武汉大学丁李副教授、湖北师范学院姜晓伟副教授共同撰写而成。此外,昆明理工大学杨春曦副教授参与了第5章的撰写,同时本书内容还引用了关治洪教授研究团队的王后能副教授、詹习生副教授、王宝贤博士等人的研究成果,在此对他们表示感谢。本书介绍的研究工作得到多个国家自然科学基金项目的资助,如国家自然科学基金重点项目“网络环境下融合通信参量的系统控制理论与方法”(编号60834002)、国家自然科学基金面上项目“有通讯约束的群集智能混杂网络的渐近行为与优化设计”(编号61073025)、国家自然科学基金青年基金项目“基于时滞随机跳变系统的无线通信网络拥塞控制研究”(编号60603006)等,在此一并致谢。

作 者

2015年4月于华中科技大学

目 录

“信息化与工业化两化融合研究与应用”丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 网络控制系统概述	1
1.2 网络控制系统的研究现状	3
1.2.1 网络控制系统的建模	4
1.2.2 网络控制系统的性能分析	6
1.2.3 网络控制系统的设计方法	7
1.3 研究现状分析及本书主要内容	8
参考文献	10
第 2 章 基于混杂系统理论的网络控制系统研究	18
2.1 引言	18
2.2 网络控制系统中的混杂现象	19
2.3 网络控制系统的混杂控制	20
2.4 有关概念与引理	22
2.4.1 混杂脉冲切换系统概述	22
2.4.2 混杂脉冲切换系统理论的有关结果	24
2.4.3 马尔可夫跳变系统理论的一些常用结果	28
2.5 本章小结	32
参考文献	32
第 3 章 基于切换系统理论的网络控制系统分析与设计	34
3.1 引言	34
3.2 有损网络控制系统的切换系统模型	34
3.2.1 离散情况	34
3.2.2 连续情况	35
3.3 有损网络控制系统基于切换系统模型的 H_∞ 鲁棒控制器设计	36
3.4 有损网络控制系统基于切换系统模型的保成本控制器设计	42
3.5 带时滞的网络化切换系统的鲁棒耗散控制设计	46
3.5.1 问题描述	46
3.5.2 耗散性分析	48

3.6 本章小结	52
参考文献	52
第4章 基于脉冲系统理论的网络控制系统分析与设计	55
4.1 引言	55
4.2 有损网络控制系统的脉冲系统模型	55
4.2.1 离散情况	55
4.2.2 连续情况	58
4.3 有损网络控制系统基于脉冲系统模型的鲁棒控制器设计	60
4.3.1 脉冲差分系统的稳定性结果	60
4.3.2 不确定有损网络控制系统的鲁棒镇定	62
4.4 有损网络控制系统基于脉冲系统模型的保成本控制器设计	65
4.5 网络化脉冲控制系统的分析与设计	71
4.5.1 丢包影响的 NICS 的渐近稳定性分析	72
4.5.2 带传输时延的 NICS 的渐近稳定性分析	75
4.5.3 带时延和丢包的 NICS 的渐近稳定性	78
4.5.4 带数据丢包的 NICS 的控制器设计	80
4.6 本章小结	82
参考文献	83
第5章 基于马尔可夫跳变系统理论的网络控制系统分析与设计	86
5.1 引言	86
5.2 基于马尔可夫跳变系统模型的 NCS 随机切换控制	86
5.2.1 低维随机切换控制器设计	88
5.2.2 基于贪婪算法的有限维随机切换控制器设计	92
5.2.3 基于贪婪算法的切换规则设计	101
5.3 基于马尔可夫跳变系统模型的 NCS 随机容错控制	103
5.3.1 问题描述	103
5.3.2 不确定网络控制系统稳定性分析	104
5.3.3 不确定网络切换控制系统稳定性分析	108
5.3.4 网络控制系统控制器可靠性分析及容错控制器设计	110
5.4 基于马尔可夫跳变系统模型的 NCS 多率控制	111
5.4.1 多率网络控制系统建模	112
5.4.2 网络控制系统稳定性分析	116
5.5 本章小结	122
参考文献	122

第 6 章 网络控制系统性能极限概述	125
6.1 引言	125
6.2 控制系统的跟踪问题	125
6.3 控制系统的跟踪性能极限	126
6.4 网络控制系统性能极限	128
6.5 符号说明	129
6.6 若干概念和引理	131
6.6.1 Parseval 定理	131
6.6.2 Cauchy 积分公式	131
6.6.3 多输入多输出对象传递函数的若干法则	131
6.6.4 互质分解	132
6.6.5 Youla 参数化	133
6.6.6 多输入多输出系统的非最小相位零点和不稳定极点	133
6.6.7 全通与最小相位分解	135
6.7 本章小结	136
参考文献	137
第 7 章 基于脉冲干扰的网络控制系统跟踪性能极限	141
7.1 引言	141
7.2 最小控制能量	142
7.2.1 问题描述	142
7.2.2 单输入单输出情形	143
7.2.3 多输入多输出情形	147
7.2.4 两自由度控制系统的最小控制能量	150
7.3 单通道脉冲扰动下的跟踪性能极限	151
7.3.1 问题描述	151
7.3.2 跟踪性能极限分析	153
7.3.3 数值仿真	155
7.4 双通道脉冲扰动下的跟踪性能极限	156
7.4.1 问题描述	156
7.4.2 跟踪性能极限分析	157
7.4.3 数值仿真	161
7.5 本章小结	162
参考文献	163
第 8 章 基于高斯噪声的网络控制系统跟踪性能极限	164
8.1 引言	164

8.2 高斯噪声下网络控制系统跟踪性能极限	164
8.2.1 问题描述	164
8.2.2 高斯噪声下单位反馈网络控制系统跟踪性能极限	165
8.2.3 高斯噪声下两自由度控制器网络控制系统跟踪性能极限	171
8.2.4 数值仿真	172
8.3 高斯噪声下带宽有限网络控制系统跟踪性能极限	174
8.3.1 问题描述	174
8.3.2 基于带宽限制离散网络控制系统跟踪性能极限	176
8.3.3 数值仿真	180
8.4 本章小结	181
参考文献	182
第9章 含有编码器-解码器的网络控制系统最优跟踪性能	183
9.1 引言	183
9.2 问题描述	183
9.3 编码器-解码器存在于反馈通道中的系统最优跟踪性能	184
9.4 编码器-解码器存在于前馈通道中的系统最优跟踪性能	187
9.5 数值仿真	190
9.6 本章小结	192
参考文献	192
索引	195

第 1 章 绪 论

1.1 网络控制系统概述

20 世纪 80 年代后期,计算机网络广泛进入自动控制领域。计算机网络与自动控制系统相结合,使得控制系统规模更大、结构也更加复杂,从功能上看,使得控制系统还具有信息处理、管理、决策等功能,故统称为网络化控制系统,亦即**网络控制系统**(networked control system, NCS)。

从控制系统的观点看,网络控制系统是指控制系统中的信号通过网络传输的系统。网络的引入,使得控制系统具有高集成度、低开发成本的优点。因此,目前网络控制系统已成为国内外自动控制领域的研究热点。可以预计,在未来的几十年,网络控制的研究必将深刻影响和推动控制理论特别是复杂系统控制理论的发展。同时,随着各种复杂信息处理的网络化系统的大量涌现,网络控制系统的研究必将极大推动国家经济、社会、国防等领域的信息化应用,促进国家的“以信息化带动工业化”的迅速发展^[1]。

第一代将网络化环境与控制功能相结合的系统形式是所谓的**分布式控制系统**(distributed control system, DCS)。DCS 的一般结构概图如图 1.1 所示。

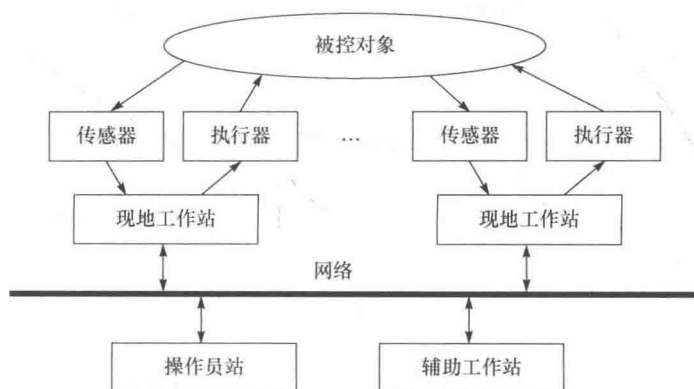


图 1.1 分布式控制系统的结构示意图

最早出现的 DCS 系统是霍尼韦尔(Honeywell)公司 1975 年开发的 TDC-2000 系统。在 DCS 系统中,现地工作站、操作员站以及一些其他辅助工作站等功能不同的计算机由通信网络实现互联,共同分担系统的工作。其中现地工作站主

要用于过程控制,操作员站用于操作员监视过程控制的情况,其他辅助工作站主要用于数据记录、系统优化等功能。然而,在 DCS 系统中各个控制单元之间只是一种“松散”的连接关系,这是因为绝大部分基本的控制任务(传感器采集、控制律计算、控制输出执行等)均在各个现地工作站上独立完成,用于控制的实时信号并未经过网络进行传输。在 DCS 系统中,仅有一些简单的开关信号、报警信息、监视信息等通过网络共享。

20 世纪 90 年代以来,微芯片的发展日新月异,其价格也不断降低,同时网络技术在人们的生产、生活中广为使用,这一切都为发展网络化的控制系统提供了良好的契机。时至今日,基于现场总线等控制网络的网络控制系统已在各行各业得到了广泛的应用。

网络控制系统的典型结构与信息流如图 1.2 所示(其中虚线表示实时控制信息的传输)。

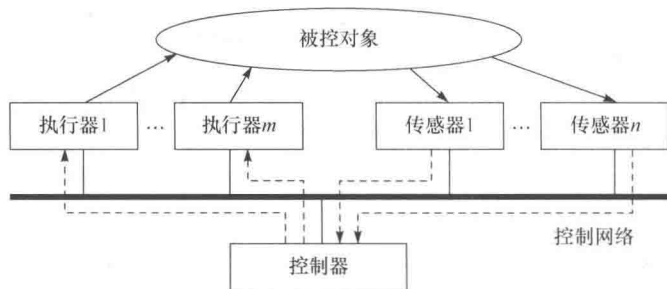


图 1.2 网络控制系统的典型结构

由图 1.2 可以看出,网络控制系统在结构上与分布式控制系统的最大区别是:传感器、执行器和控制器离散地分布于广阔的空间之中,它们之间的信息交换通过控制网络实现,而在 DCS 系统中,使用一个现地控制站管理所有这些内容。NCS 中用以传递实时控制信息的纽带为控制网络,一般认为控制网络具有不同于通常的数据网络的特点,为适应控制任务的需求它们的实时性要大大强于普通的数据网络。当前具有代表性的控制网络有:现场总线(DeviceNet、Profibus、FF、Lonworks、SwiftNet、WorldFIP、Interbus 等)、工业以太网、串行通信总线(IEEE 485/422)等。此外,由于有线网络存在成本高、施工周期长、维护不方便等诸多不足,无线与有线相结合的网络结构必将在未来 NCS 中得到广泛应用。相比于有线网络,无线网络具有连接不可靠、带宽窄、误码率高、路由复杂、更大的时延和丢包等缺点,因此目前无线 NCS 的实现仍是一个具有挑战性的任务。

与传统的集中式控制相比,网络控制系统具有结构网络化、节点智能化、控制现场化、功能分散化、系统开放化和产品集成化等特点。这些特点使得网络控制系统具有如下显著优点^[2]:

(1) 成本低、安装维护简单。

(2) 智能节点的模块化设计大大提高了系统的灵活性和可靠性。

(3) 通过网络可以非常方便地实现一定区域范围内不同用户的资源共享,便于远程操控和故障诊断。

另一方面,网络介入传统控制系统不可避免地带来了新的问题,主要表现在:

(1) 控制网络的通信带宽是有限的,同时,由于信息源的不断增多,在特定网络协议环境下,可能存在信息传递的冲突、重发现象;另一方面,信息在网络中的传送也要耗费时间,因而网络中一般存在**传输时滞**。控制系统中的信息传输时滞必然导致其性能的下降,甚至可能破坏整个系统的稳定性。

(2) 一般控制网络通过数据包交换实现通信,如果传感器或控制器的待发数据较少,在每个采样周期所有数据可封装在一个数据包中进行传输,这种通信方式称为**单包传输**;但由于实际网络通信中的数据帧长度是有限制的,当待发数据较多时,只能将其分成多个数据包分时发送,这种方式称为**多包传输**。因此,网络控制系统通常需要考虑多包传输的情形。

(3) 为了避免有限带宽造成的时滞影响,许多系统选择了减少每次通信任务传递信息量的做法,即每次通过网络得到的反馈数据仅反映系统的部分而非全部状态信息,这种情况我们通常称之为**通信约束**(communication constraint)。显然,一个原本正常的系统在通信约束造成部分状态反馈不能及时到达的情况下,其控制性能必然下降。

(4) 通信信道中存在的干扰,有可能导致通信失败,从而导致分组(packet)的丢失,亦即所谓的**数据丢包**(data dropouts)现象。

(5) 传统的控制系统一般假定基于统一时间采样、系统中所有部件同步工作、信号传输完美(无丢包且传输时滞固定);NCS一般基于分组交换网络、信号可能发生丢失并且传输时滞是不确定的,各个部件的工作是**异步**(asynchronous)的。

随着以互联网为代表的网络技术的高速发展和网络控制系统具有上述相对于传统控制系统的明显优势,近几年各种各样的网络控制系统不断涌现,并越来越多地应用到各行各业,如远程医疗、远程教学和试验、机器人遥操作、建筑自动化、智能家居、智能车辆控制、航空航天等^[3,4]。然而,网络的介入带来了许多如上所述新的问题,针对这些问题,迫切需要建立新的控制理论和新的综合方法,深入分析和研究网络环境下的控制系统,有效提高网络控制系统的性能。

1.2 网络控制系统的研究现状

网络控制系统的研究主要包括两部分:一是从保证服务质量(quality of service, QoS)角度的网络调度问题,侧重于网络传输质量和效率,以保证网络的信息

传输和远程通信服务质量为目标,研究设计有效的网络调度策略和网络通信协议;二是从保证控制系统的性能质量(quality of performance, QoP)角度的控制问题。这一部分主要研究系统的稳定性、动态性能及控制策略的设计,以保证系统性能良好。

基于 QoS 的网络调度方法方面主要研究在有限带宽条件下合理调度 NCS 的各种传输数据、充分配置网络带宽、有效控制网络负荷以限制网络时延的范围和减少丢包、抖动的发生,从而确保 NCS 预期的控制性能。网络控制系统中信息的调度主要在用户层或传输层,调度的主要目的在于提高网络的利用率和提高系统的综合性能,主要调度参数为信息传输周期及信息的优先级。近年来人们提出了一些有效的网络调度算法,主要有 RM(rate monotonic)算法^[2,5]、TOD(try once discard)算法^[6,7]、基于 MADB(maximum allowable delay bounds)的多控制环采样调度算法^[8,9]、基于网络 QoS 的控制增益调度算法^[10]以及模糊增益调度算法^[11]等。此外,本书作者在基于 QoS 的研究框架下,对网络系统的拥塞控制、基于信息反馈的调度方法等的研究也得到了一些成果^[12-18]。

本书主要关注基于 QoP 的网络控制系统分析与设计问题,因此下面着重对这方面的研究现状进行综述。

1.2.1 网络控制系统的建模

在网络控制系统建模研究方面,人们针对 NCS 中出现的时滞、丢包、通信约束等相关现象提出了各种各样的模型描述。

1) 网络控制系统的时滞现象建模研究

信息传输的时滞在网络化环境中是普遍存在的,这种时滞的长度有时会很大(如基于 Internet 网络的控制系统),并且是时变的或随机的,以至于在分析系统性能时无法忽略其影响。对网络时滞的研究是网络控制系统最重要的研究内容之一。

Zhang 在确定性系统框架内应用采样控制理论对网络控制系统进行建模与分析,将定常传输时滞分为小于和大于一个采样周期的情况分别论述,并提出了时滞补偿方案^[2];Xie 等在文献^[19]中以参数不确定连续时滞系统模型描述 NCS,并利用改进的 Razumikhin 定理^[20]得到了全状态反馈时定常信息传输时滞的估计上界;Lian^[21]在离散控制系统的框架内考虑各种可能的时滞,建立了网络控制系统模型。

Yu 等在文献^[22]中提出将随机时变时滞变换为最大可能时滞的方法从而把时变的、随机的系统转变为定常系统解决,并设计了状态观测器与时滞补偿器等;Jiang 等^[23]将时滞的不确定性转化为系统参数矩阵的不确定性,提出了 NCS 不确定状态方程模型。Yang 等^[24]分析了传输时滞的构成和不确定性,并结合数据特

征探讨了几种与时滞特性密切相关的数据传输技术和常用协议的技术构成;Hu 考虑了只知道部分时延信息时网络控制系统的建模问题^[25];本书作者针对 NCS 的时变时滞现象提出了离散区间系统模型^[26]。

Nilson^[27]在离散控制系统的框架内,详细研究了各种网络时滞的模型,将网络时滞分类为定常型、独立随机型和马尔可夫链的随机型;Yu 对通信过程中的随机传输时滞提出一种延迟补偿器的结构,实现了对随机通信时滞的补偿和对信号的最小方差预测^[28,29];Zhu 等^[30,31]讨论了当传输时滞小于一个采样周期时,用随机微分方程对 NCS 进行建模的问题。近年来的一些 NCS 相关研究则倾向于将前馈和反馈通道的时滞借助于两个相互独立的马尔可夫链进行处理^[32,33],这样可用马尔可夫跳变系统模型对 NCS 进行描述;本书作者在马尔可夫跳变系统的框架下建立了具有随机短时滞和长时滞的 NCS 模型^[34,35]。

2) 网络控制系统的丢包现象建模研究

很多时候,通信信道中都存在着干扰。这些干扰有可能使通信过程失败,从而导致分组的丢失,即所谓的数据丢包现象。另外,许多不安全的通信协议(如所谓的“无连接”的通信协议)也会造成类似的问题。一般的,我们把可能发生数据传输丢包的网络控制系统称为有损网络控制系统。显然,足够长时间的丢包很有可能破坏控制系统的性能。

目前,对网络丢包问题的研究可以分为两大类:第一类是随机的方法,例如,假设网络的丢包规律满足某个概率分布,用马尔可夫链^[36,37]或者伯努利随机序列^[38,39]来刻画系统的不确定丢包行为。近年来,这种方法也被用于含数据丢包的网络控制系统的远程滤波器研究工作中^[40]。第二类方法是确定性模型的方法,这种方法首先把存在丢包的网络控制系统建模为切换系统(switched systems)^[36],然后借用切换系统的丰富理论对含随机丢包的网络控制系统进行稳定性分析或者控制器的综合。本书作者在确定性模型的框架下应用切换系统和脉冲系统理论对带丢包的 NCS 建立了相应的模型^[41-43]。

3) 网络控制系统的通信约束现象建模研究

很多情况下,限制网络控制系统性能的主要因素并非处理器的计算能力,而是所有传感器、控制器和执行器分享通信介质的时间。由于带宽的有限性,在同一时刻网络只能传递系统有限的输入输出信号,只传输部分数据的好处在于,此时传输时滞通常是可以忽略的(部分数据的通信耗时显然小于全部数据的通信耗时),一般我们把这种通信受限制的 NCS 称为带约束的网络控制系统。

关于带约束的网络控制系统,许多文献已进行了相关研究并得到了一定的结果。Brocket^[44-47]用周期分时的方法实现了通信网络的调度,并建立了相应的模型;Hristu 和 Morgansen^[48,49]研究了在通信受限的情况下,单个决策器通过网络控制许多子系统的实际问题,并建立了具有控制和通信双重优化目标的离散系统