



信息科学技术学术著作丛书

网络化控制系统的新进展

郭戈 卢自宝 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
大连市学术著作出版基金资助出版
信息科学技术学术著作丛书

网络化控制系统的新进展

郭 戈 卢自宝 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面介绍了作者近年来在网络化控制系统领域的研究成果。主要包括:网络化系统的控制与调度协同设计概述;信道接入静态调度与反馈控制协同设计;信道接入动态调度与反馈控制协同设计;信道接入动-静态混合调度与反馈控制协同设计;随机信道接入调度下的反馈控制设计;群体网络化系统的通信调度与同时镇定设计;同时存在信道受限和信道衰落的网络化控制系统分析与设计;基于车联网的无人车辆网络化协作控制等。

本书可作为控制科学与工程、系统工程、物联网工程等专业研究生教材或参考书,也可供相关领域从事自动控制理论、应用技术教学及科研的工作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

网络化控制系统的新进展/郭戈,卢自宝著. —北京:科学出版社,2015.3
ISBN 978-7-03-043100-4

I. ①网… II. ①郭… ②卢… III. ①计算机网络-自动控制系统-研究
IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 016048 号

责任编辑:孙伯元 刘宝莉 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 3 月第一次印刷 印张:16 3/4

字数:320 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



郭戈, 1972 年 1 月出生, 教授、博导。担任 *International Journal of Systems, Control and Communications* 执行主编、*Information Sciences* 副主编、《自动化学报》编委, IEEE 高级会员、中国自动化学会过程控制委员会委员、青年工作委员会委员。在国内外著名刊物及会议发表论文 160 余篇, 其中, SCI 收录 40 余篇、EI 收录 84 篇。在国家级出版社出版专著 3 部, 其中 1 部获国家科学技术学术著作出版基金资助。主持参与国家、省部级科研项目近 20 项, 研究成果获辽宁省科技进步奖一等奖、甘肃省科技进步奖一等奖、国家计算机软件著作权 2 项。先后获甘肃省百千万人才(百层次)、教育部新世纪优秀人才(首批)、甘肃省“十大杰出青年”提名、霍英东教育基金、大连市领军人才、浙江省“钱江学者”客座教授等荣誉。已培养硕士、博士研究生 58 人。



卢自宝, 1985 年 2 月出生, 2013 年 12 月毕业于大连海事大学, 获工学博士学位, 现为安徽师范大学讲师。博士在读期间获得博士研究生国家奖学金、大连海事大学优秀博士培育基金。在国内外著名刊物及会议发表论文 12 篇, 其中 SCI 收录 7 篇, EI 收录 5 篇。主持参与国家、省部级科研项目 4 项。

《信息科学技术学术著作丛书》序

21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代,一场以网络科学、高性能计算和仿真、智能科学、计算思维为特征的信息科学革命正在兴起。信息科学技术正在逐步融入各个应用领域并与生物、纳米、认知等交织在一起,悄然改变着我们的生活方式。信息科学技术已经成为人类社会进步过程中发展最快、交叉渗透性最强、应用面最广的关键技术。

如何进一步推动我国信息科学技术的研究与发展;如何将信息技术发展的新理论、新方法与研究成果转化为社会发展的新动力;如何抓住信息技术深刻发展变革的机遇,提升我国自主创新和可持续发展的能力?这些问题的解答都离不开我国科技工作者和工程技术人员的求索和艰辛付出。为这些科技工作者和工程技术人员提供一个良好的出版环境和平台,将这些科技成就迅速转化为智力成果,将对我国信息科学技术的发展起到重要的推动作用。

《信息科学技术学术著作丛书》是科学出版社在广泛征求专家意见的基础上,经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播网络科学和未来网络技术,微电子、光电子和量子信息技术、超级计算机、软件和信息存储技术,数据知识化和基于知识处理的未来信息服务业,低成本信息化和用信息技术提升传统产业,智能与认知科学、生物信息学、社会信息学等前沿交叉科学,信息科学基础理论,信息安全等几个未来信息科学技术重点发展领域的优秀科研成果。丛书力争起点高、内容新、导向性强,具有一定的原创性;体现出科学出版社“高层次、高质量、高水平”的特色和“严肃、严密、严格”的优良作风。

希望这套丛书的出版,能为我国信息科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时,欢迎广大读者提出好的建议,以促进和完善丛书的出版工作。

中国工程院院士

原中国科学院计算技术研究所所长



前 言

网络化控制系统是指通过实时网络形成的闭环控制系统。相对于传统的控制系统,网络化系统不但成本低、可靠性高、安装和维护简便,而且可以实现远程操作与控制。因此,网络化控制系统在大型工业控制、电力系统、智能交通、远程医疗、国防工业以及航空航天等领域得到广泛应用。

在网络化控制系统中,控制器要通过网络与数量众多的传感器和执行器进行通信。然而,网络通信资源有限,引起对信道访问权的竞争,在任意时刻只有部分传感器和执行器能够与控制器进行数据交换,这称为介质访问约束或者信道受限。介质访问约束使得控制信息和测量信号均无法及时更新,在一定程度上会降低系统的控制性能,甚至会造成系统不稳定。

由于介质访问约束的存在,必须在控制器、传感器和执行器之间合理分配有限的通信资源。此时,网络化控制系统的控制综合不仅涉及控制器的设计,还必须同时制定合理的介质访问调度策略。本书从控制与通信调度综合设计的角度出发,将网络资源限制、网络服务质量和控制质量等网络因素融入控制设计和性能优化中,在控制系统设计的同时考虑网络资源的有效调度和管理问题,从而实现控制与调度的联合设计,达到优化系统整体性能的目的。

由于部分网络化控制系统中的传感器和执行器等节点的信道接入采用随机接入控制协议,系统实质上受随机事件驱动,因此基于调度的控制方法无法适用。本书针对节点随机接入信道的网络化控制系统,采用 Markov 跳跃系统理论,系统地解决了其中的稳定性分析和控制器设计问题,并将结果推广到 Markov 过程转移速率部分未知的情形,最后研究了随机接入协议网络化系统的最优控制问题。

全书共 13 章。第 1 章概述了控制与调度协同设计及事件驱动的网络化系统的研究现状;第 2 章介绍了动态输入通信序列和状态反馈控制器协同设计方法;第 3 章介绍了多包传输下的动态输出反馈控制器和输入输出通信序列协同设计方法;第 4 章结合静态和动态通信序列的优点提出了混合调度与控制协同设计策略;第 5 章介绍了信道受限的网络化群体系统的通信调度与同时镇定问题;第 6 章和第 7 章分别介绍了输入侧和输入输出两侧受随机事件驱动接入信道的网络化控制系统分析与综合方法;第 8 章介绍了基于周期调度和随机接入混合信道调度策略的网络化系统分析与控制器设计方法;第 9 章讨论了采用零阶保持器的网络化系统建模与控制问题;第 10 章讨论了数据丢包影响下的调度与最优控制协同设计问题;第 11 章和第 12 章针对多个子系统的网络化控制系统,给出了集中式和分布式

两种控制与调度协同设计方法;第 13 章针对信道受限与信道衰落问题,给出了控制器设计方法,将所得结果应用到车载网络控制系统中。

本书的研究工作得到国家自然科学基金、霍英东教育基金、教育部新世纪优秀人才支持计划等项目的资助,在此表示衷心感谢!祝超群、王丽媛、文世喜、金辉等研究生参与撰写了本书部分章节,并做了大量的汇编整理和仿真工作,在此一并表示感谢。

感谢国家科学技术学术著作出版基金对本书出版的支持,感谢大连市学术著作出版基金的资助。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

目 录

《信息科学技术学术著作丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 网络化系统的研究现状	2
1.2.1 控制器设计	2
1.2.2 网络调度	3
1.2.3 控制与通信协同设计	4
1.2.4 事件驱动的网络化系统	8
1.3 全书内容安排	9
1.4 符号说明	11
第 2 章 输入侧通信序列与控制协同设计	12
2.1 问题描述	12
2.2 稳定性分析和控制器设计	15
2.2.1 稳定性分析	15
2.2.2 控制器设计	22
2.3 通信序列设计	24
2.3.1 切换区域和切换规则	24
2.3.2 整体稳定性分析	25
2.4 仿真算例	28
2.5 本章小结	32
第 3 章 输入输出两侧通信序列与控制协同设计	34
3.1 问题描述	34
3.2 主要结论	38
3.2.1 稳定性分析和控制器设计	38
3.2.2 通信序列设计	44
3.3 仿真算例	47
3.4 本章小结	50
第 4 章 动-静态通信序列与控制协同设计	51
4.1 问题描述	51

4.2	构建可达/可观性通信序列	52
4.3	构建动态通信序列	56
4.4	仿真算例	61
4.5	本章小结	64
第5章	网络化系统调度与最优控制	65
5.1	基于动态调度的最优控制	65
5.1.1	问题描述	65
5.1.2	主要结论	67
5.1.3	仿真算例	71
5.2	量化反馈最优控制	74
5.2.1	问题描述	74
5.2.2	主要结论	77
5.2.3	仿真算例	83
5.3	本章小结	85
第6章	输入侧随机接入信道的网络化系统	86
6.1	研究实例	86
6.2	基于模型转换法	87
6.2.1	问题描述	87
6.2.2	均方稳定性分析	88
6.2.3	有限时间概率稳定	95
6.3	基于 Lyapunov 函数法	100
6.3.1	问题描述	100
6.3.2	稳定性分析和控制器设计	101
6.3.3	仿真算例	106
6.4	本章小结	109
第7章	输入输出两侧随机接入信道的网络化系统	110
7.1	Markov 过程转移概率已知	110
7.1.1	问题描述	110
7.1.2	稳定性分析和控制器设计	112
7.1.3	仿真算例	117
7.2	Markov 过程转移概率未知	119
7.2.1	问题描述	119
7.2.2	稳定性分析和控制器设计	121
7.2.3	仿真算例	131
7.3	本章小结	134

第 8 章 信道调度与随机接入混合策略	135
8.1 问题描述	135
8.2 静态调度下的控制器设计	138
8.2.1 无限时间 a. s. 稳定性分析	139
8.2.2 有限时间 a. s. 稳定性分析	143
8.3 动态调度下的控制器设计	145
8.4 仿真算例	148
8.5 本章小结	152
第 9 章 保持策略下的控制器设计	153
9.1 执行器随机接入信道	153
9.1.1 问题描述	154
9.1.2 稳定性分析和策略比较	155
9.1.3 控制器设计和性能比较	160
9.2 随机丢包下的控制器设计	163
9.2.1 问题描述	163
9.2.2 稳定性分析和控制器设计	166
9.2.3 仿真算例	171
9.3 本章小结	172
第 10 章 信道随机接入时的最优控制	173
10.1 随机接入信道的最优控制	173
10.1.1 问题描述	173
10.1.2 有限时间最优控制器设计	174
10.1.3 无限时间最优控制器设计	178
10.1.4 仿真算例	180
10.2 随机接入和丢包的最优控制	183
10.2.1 问题描述	183
10.2.2 最优控制器的设计	185
10.2.3 仿真算例	190
10.3 本章小结	192
第 11 章 网络化群体系统的调度与集中控制	193
11.1 问题描述	193
11.2 调度函数和控制目标	195
11.3 稳定性分析	197
11.3.1 单个子系统的稳定性分析	197
11.3.2 同时稳定性和可调度性分析	199

11.4	控制与调度的协同设计	200
11.5	仿真算例	204
11.6	本章小结	208
第 12 章	网络化群体系统的调度与分散控制	209
12.1	通信协议	209
12.2	问题描述	210
12.2.1	系统模型以及调度函数	210
12.2.2	控制器结构以及控制目标	211
12.3	稳定性分析	213
12.3.1	单个子系统的能控/能观性	213
12.3.2	单个子系统的稳定性分析	216
12.3.3	同时稳定性及可调度性分析	218
12.4	控制与调度的协同设计	219
12.5	仿真算例	223
12.6	本章小结	227
第 13 章	具有信道受限和衰落的网络化系统	228
13.1	网络化控制框架	228
13.2	车载网络控制系统	234
13.2.1	问题描述	234
13.2.2	稳定性分析	236
13.2.3	控制器设计	237
13.2.4	车队仿真及实验	239
13.3	本章小结	243
参考文献		244
索引		252

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

随着计算机与通信网络技术的飞速发展,控制系统的应用领域越来越广泛,控制对象日益复杂,控制系统朝着更加分散化、智能化的方向发展。控制系统的结构发生了巨大的变化,传统控制系统中的点对点结构已由专用或公用计算机网络所代替,从而使分布在不同区域的传感器、控制器和执行器等系统组件可以通过网络相互交换控制信息。这种通过网络形成的闭环反馈控制系统称为网络化控制系统(networked control system, NCS)。这一概念首次出现于 20 世纪 90 年代, Ray 等^[1]在有关集成通信控制系统(integrated communication and control system, ICCS)的研究中提出了网络化控制系统的初步概念。网络化控制系统打破了传统控制系统在空间物理位置上的限制,拓宽了控制活动的场所,与传统的控制系统相比,这种系统具有效率高、灵活性和可操作性好、可靠性高、安装和维修简便、成本低等优点,实现了信息资源共享,提高了系统资源的利用率。NCS 凭借着自身的优势逐渐成为各种远程控制和自动化应用的主角,在工业、军事、航空航天、电力、医疗、交通等诸多领域都获得了成功的应用。因此,网络化是控制系统发展的必然趋势,具有广阔的应用前景。目前, NCS 已成为国际控制理论界的一个学术热点问题。

由于网络化系统以及通信系统本身所具有的特性, NCS 在通过共享网络资源给控制系统带来了各种优点的同时,也给系统和控制理论带来了新的挑战。一方面,网络化控制系统中的各类信息以分时复用的方式共享有限的网络资源,网络中数据包的传输速率、数据包长度以及所采用的介质访问控制方式均影响着网络控制系统的性能。因此,网络的介入不可避免地在控制回路中引入了网络诱导时延、数据包丢失等问题,传统的控制方法已无法适用于网络化控制系统,迫切需要研究新的控制理论与方法。如何分析网络给控制系统带来的网络延时和丢包等问题,并在此基础上进行控制器设计、稳定性分析、系统分析与综合等,是当前网络化控制系统研究的热点和难点。另一方面,网络是信息传输的载体,网络化系统必然存在着信息调度的问题。在网络化控制系统中,采用合理的调度策略,可以在一定程度上减少冲突、阻塞等不利因素的发生,从而减小网络诱导延迟和数据包丢失等网络诱导因素对系统的影响,对改善网络化控制系统性能具有重要的意义。因此,与传统的点对点控制系统不同,网络化控制系统的性能不仅依赖于控制算法的

设计,还依赖于对网络资源的合理调度。先进的控制算法可以保证控制品质 (quality of performance, QoP),合理的调度策略则可以确保网络的服务质量 (quality of service, QoS),两者之间存在着相互影响、相互制约的内在联系。因此,在网络化控制系统中有必要同时考虑控制和网络两方面,以保证控制品质的和网络服务质量。

在网络化控制系统中,从兼顾 QoP 和 QoS 的角度出发,进行控制与调度协同设计,有利于系统的总体性能的优化。在控制与调度协同设计的框架下,设计控制策略必须考虑共享资源的可用性,并能允许控制性能和共享资源调度性能的折中。调度算法的设计也应顾及控制回路的性能。总之,从控制与调度综合的角度对网络化控制系统合理地建模、分析和设计,是网络化控制系统所必需的理论基础和技术支撑。

到目前为止,NCS 的研究已取得了一系列研究成果,主要集中在以下三个方面:①从控制的角度将现有的网络结构、协议当做既定条件,并在此基础上设计控制系统的结构和控制算法,以此补偿网络延时、数据包丢失等问题对系统的不良影响;②从网络通信的角度设计通信序列和通信协议,从而减少网络延时、数据丢失等问题对控制系统的影响;③综合考虑网络通信和控制两方面,进行网络调度、通信协议与控制的协同设计。

接下来,将针对控制器设计、网络调度和控制与调度协同设计三个方面对网络化控制系统的研究现状、最新进展进行分析和探讨。

1.2 网络化系统的研究现状

1.2.1 控制器设计

关于控制器设计方面的研究工作主要集中在如何消除或克服延迟、丢包等通信限制因素的影响。有关延迟问题的研究很多,但最初的研究多集中于定常延迟,例如文献[2]研究了已知定常延迟对系统建模与控制的影响,设计了最优控制器。然而延迟在本质上是随机的,因而随机延迟 NCS 是目前研究较多的一个问题。Nissson^[3]针对随机短时的 NCS,建立了系统的离散时间模型,给出了 LQG(linear quadratic gaussian)随机最优控制器和状态观测器的设计方法。随后,文献[4]针对更为复杂的随机长时延分别研究了单包和多包传输 NCS 的建模与随机最优控制器设计方法。以上关于随机延迟的研究是在假设延迟分布已知的基础上进行的,然而在实际应用中由于不可能长时间地获取延迟样本数据,得到的延迟统计特性只能是近似的,因此在一定程度上会降低方法的有效性。针对上述情况,文献[5]在延迟分布未知的情况下,设计了一种能够对时变延迟进行补偿的状态观测器,该状态观测器只要求时间延迟有界即可。此外文献[6]采用时钟同步化方法对

不确定延迟进行在线估计,并基于所获得延迟估计值设计了 LQR(linear quadratic regular)最优控制器。但这种方法的缺点是要要求所有节点的时钟完全同步化。文献[7]提出了一种无需同步化的延迟估计方法——平均时延窗口法。

关于丢包这一重要问题,Gupta 等^[8]首先证明了一种改进的分离理论,来求解传感器和控制器之间存在数据丢失情况下 NCS 的标准 LQR 最优控制问题。对于网络两端同时存在数据包丢失的情况,Imer 等^[9]研究了线性时不变 NCS 的最优控制问题。根据确认信号是否可用,分别讨论了在 TCP(transfer control protocol)协议和 UDP(user datagram protocol)协议下如何设计了使二次性能代价最小且保证系统均方稳定的最优控制器。前面这些关于丢包问题的研究主要针对任意丢包的情况,而对服从某一分布的丢包问题未作分析。文献[10]将具有随机丢包的 NCS 建模为一类具有 Markov 跳跃参数的离散时间线性系统,使用 H_∞ 范式衡量系统性能并通过矩阵不等式条件进行求解,并给出了 H_∞ 控制器存在的充要条件。文献[11]在此基础上进一步分析了离散 NCS 系统的 LQG 最优控制问题,并给出了保持系统稳定的丢包概率临界值。

另外,也有学者综合考虑延时和丢包两种影响因素进行了有关研究。Yue 等^[12]建立了同时考虑网络延时和丢包的 NCS 模型,提出了一种基于延时的状态反馈控制器设计方法,通过求解线性矩阵不等式获得最大允许延时和控制器增益。文献[13]在此基础上分析了 NCS 的鲁棒 H_∞ 控制器设计问题,通过引入松弛矩阵变量和延迟下界信息提出了一种新的 H_∞ 性能分析方法,并通过仿真证明了该方法的有效性。

1.2.2 网络调度

NCS 的性能不仅取决于所采用的控制策略,也受到网络调度算法的影响。一个有效的调度算法可以很好地提高控制性能,更好地分配网络带宽的使用。网络调度一般分为静态调度和动态调度两种类型,前者指在系统运行前已经建立网络带宽的使用规则,而在运行中不发生变化,例如速率递减(rate monotonic, RM)算法,令牌环协议等;后者指信息调度规则能够在系统运行中根据系统的状态进行调整,如动态调度方法和 CLS- ϵ (contain the largest state)策略。文献[14]考虑在信息传输不可抢占这一约束下,将 RM 调度策略推广到 NCS 中。但这种调度策略只适用于周期数据,且无法处理传输冲突。文献[15]提出采用基于时间窗的静态调度方法,这种算法在很大程度上避免了冲突的发生,提高了网络资源的利用率,但也只适用于周期性数据。文献[16]对文献[15]进行了扩展,针对 NCS 中的周期性数据、猝发性数据和非实时性信息数据分别设计了带宽分配调度方法,更好地满足了控制系统的实时性要求,同时实现了网络带宽利用率的最大化。此外,文献[17]针对令牌型 NCS 提出了一种基于抖动的最优带宽调度算法,利用抖动建立控制性

能和带宽分配之间的关系,并根据系统状态调整采样周期。

由于静态调度策略难以适应网络中信息流的时变性,不利于网络资源的合理利用,研究动态调度策略非常必要。文献[18]采用 MEF-TOD(maximum error first, try once discard)策略处理具有耦合动态的 NCS,以在线获取的网络诱导传输误差为基础,动态地分配网络带宽。这样,当多个节点发生传输冲突时,误差权值最大的节点可优先传输数据,竞争失败的节点则放弃本次传输。这种方法既可保证设备接收最新数据,又可解决节点冲突问题,大大降低了网络拥塞率,缩短了平均传输延迟。不过,采用这种策略获得的稳定性条件较保守。为此,文献[19]提出采用 CLS- ϵ 调度策略,其主要思想是状态离原点最近的子系统获得介质访问权,保证系统渐近稳定性。

1.2.3 控制与通信协同设计

NCS 由网络和控制两部分组成,系统的性能品质 QoP 取决于控制算法的设计,网络的服务质量 QoS 则依赖于网络通信策略和通信质量。因此,在 NCS 中有必要同时考虑网络和控制两方面的因素。按照通信策略的两种不同表现形式,即通信序列和通信协议,可将控制与通信协同设计问题分为两个方面:①控制与通信序列的协同设计;②控制与通信协议的协同设计。

1. 控制与通信序列的协同设计

在网络化控制系统中,由于通信信道有限,在任意时刻只有有限数目的传感器和执行器可以获得信道访问权并与控制器进行通信,通常也将这种通信约束称为介质访问约束。因此,介质访问约束下 NCS 分析和控制中一个非常重要的任务便是确定传感器、执行器和控制器之间交换信息的顺序,即通信序列设计。

在通信网络中,介质访问约束通常通过介质访问控制协议来实现。介质访问控制协议通常分为两类:顺序介质访问协议和随机介质访问协议。相应地,通信序列的设计也可分为两种:离线设计和在线设计,或称静态调度和动态调度。下面分别针对静态调度和动态调度两方面分析控制与通信序列协同设计的研究进展。

1) 静态调度下控制与通信序列协同设计

由于介质访问约束的存在,NCS 的控制综合问题不仅要考虑反馈控制器的设计,而且要分析通信序列的设计。在静态调度下,传感器和执行器按照预先定义的周期方式获得信道访问权,即采用周期通信序列描述传感器和执行器的介质访问状态^[20]。因此,静态调度下非常便于设计最优通信序列。文献[21]针对对角型 NCS 研究了通信序列的设计问题,文中指出,镇定化通信序列的存在与各个子系统闭环/开环 Lyapunov 函数的衰减/增长速率有着密切的关系。文献[22]针对相似结构的 NCS 进行了研究,通过分析指出,为确保系统稳定性,每个子系统必须以

某一特定的速率形成闭环回路。基于以上速率条件,文献[23]提出了采用速率递减 RM 算法实现介质访问调度的方法。RM 算法的基本思想是:为了获得较高的介质访问权,子系统必须以较高的速率形成闭环回路。文献[24]给出了在 RM 调度策略下,一组非抢占性周期任务可调度性的充分条件。此外,有效的通信序列可以通过求解最优化问题来设计,即在有限时间内,对所有可能通信序列进行搜索,以获得有效的通信序列。文献[25]将周期为 N 的最优通信序列问题看成一个组合优化问题,并通过穷举的方法来寻找该组合问题的最优解。由于离散搜寻空间巨大,目标函数很难计算,这种穷举法搜寻策略非常复杂且搜寻效率不高。为此文献[26]提出一种更有效的搜寻最优通信序列的策略,利用动态规划的思想有效地剪除搜索树上部分枝干以避免组合扩张,通过对合并搜索树性能指标进行反向迭代,获得最优通信序列和最优控制律。虽然以上几种方法能够有效地确定通信序列,但这些最优搜索方法速度慢、计算量大。文献[27]采用启发式和凸优化相结合的方法寻求最优通信序列,与上述穷举搜索法相比,这种方法的计算量大为减少。

即使通信序列预先给定,控制器的设计也是一个巨大的挑战^[28]。文献[20]研究了 NCS 中一组非耦合离散线性对象在有限带宽下的协同设计问题,文中将传感器的介质访问状态用周期通信序列来描述,并假设在通信介质接收端采用零阶保持器(zero-order hold, ZOH)。该文献指出,每个通信序列对应扩充矩阵空间中的一个仿射子空间,每一个子空间同时又对应着一个反馈增益,但并没有给出控制增益的解。文献[29]将文献[20]的工作扩展到耦合系统,采用状态扩充法将闭环系统建模为一个高维仿射矩阵方程。文献[30]进一步研究了介质访问约束同时存在于传感器和执行器两端的一般 NCS。文献[29],[30]都在给定通信序列下采用模拟退火法,通过使闭环系统的谱半径最小来确定可使系统镇定的控制增益。但这种方法计算量大,且解的存在无法确保。为此,文献[31]通过设计保证对象可达性和可观性的周期通信序列,采用周期系统理论来设计镇定化反馈控制器增益。

通过以上分析可知,现有的研究方法只针对已知周期通信序列提出了控制器设计方法,或在预先设计的控制器下,设计了反馈镇定介质访问策略。此外,大多数现有研究只针对非耦合对角型 NCS 或介质访问约束存在于对象输入端的情况进行了分析^[20,23~27]。尽管采用文献[29]提出的方法可以处理耦合动态,但是所得结果过于保守,且计算量大。以上研究成果的部分困难是由通信信道接收端使用的 ZOH 造成的,因为它引入了时变延迟,使通信和控制产生了一定程度的耦合。为此,文献[32]提出另一种 NCS 结构,当传感器或执行器未能获取通信信道时,将 0 送给控制器或对象。这种做法有两方面的优点:一是降低了闭环动态的复杂性;二是通信序列的选择可与控制器的设计分开进行。采用文献[32]中的建模方法,文献[33]进一步讨论了介质访问约束和已知延迟共存时 NCSs 的控制问题,其中采用周期通信序列实现对传感器和执行器的访问调度。作为该文献工作的延续,

文献[34]提出了服从介质访问约束和定常延迟 NCS 的 LQG 控制设计问题。

2) 动态调度下控制与通信序列协同设计

在静态调度下,控制器不能对相应传感器或执行器做出及时反应,因此当存在不可测扰动时,NCS 系统的鲁棒性较差。此外,采用静态通信序列时需要将所有的传感器、执行器和控制器进行时钟同步化,实施难度很大。而动态调度策略则可以避免上述问题,动态调度策略可以通过随机介质访问协议来实现,现讨论如下。

文献[35]采用模型预测控制(model predictive control, MPC)方法实现对控制命令的在线调度,并解决系统镇定化问题。然而这种方法只适用于离散系统。为克服这一不足,文献[36]提出了优化滚动算法,文中采用搜索最近邻域的方法来求解最优控制问题。不过,这种方法要求控制命令属于有限集合,当控制命令集合增大时会导致优化问题的求解非常困难。为此,文献[37]主要研究带宽有限的确定性 NCS 最优控制和调度问题,基于文献[35]的思想将具有通信约束的多变量线性系统建模为混合逻辑动态(mixed logical dynamic, MLD)系统,并将 MLD 模型转化为混合整数二次规划(mixed integer quadratic programming, MIQP)问题,然后采用模型预测控制方法得到一种高效的在线调度算法——最优指针配置(optimal pointer placement, OPP)调度算法,并将其应用到汽车刹车控制系统中。与文献[35]只适用于离散系统不同的是,该方法由于采用自适应调度策略,只适用于采样数据控制系统。这种调度方法可以看做离线调度和在线调度算法的折中。

以上研究只针对介质访问约束存在于对象输入端的情况进行分析,而对于网络两端同时存在介质访问约束的情况,文献[38]讨论了线性 NCS 的控制与动态通信序列协同设计问题,采用与文献[37]不同的建模方法,即忽略未获得通信介质的对象或控制器的输出,在极点配置基础上提出了保证闭环系统稳定性的介质访问策略。

2. 控制与通信协议的协同设计

关于控制与通信协议协同设计的研究主要有两个方面,一是控制器和通信协议共同设计,二是设计支持给定协议的控制器。

1) 控制器与协议共同设计

文献[39]和[40]讨论了在通信约束下的 NCS 建模方法。首先在不考虑网络的情况下设计控制器,然后确定可保证闭环系统稳定性的最大允许传输间隔(maximum allowable transmission interval, MATI),并将其作为可调参数。采用这种控制方法时,控制器和协议可以独立设计,这在很大程度上降低了设计的复杂性。这种方法适用于线性系统^[39]和非线性系统^[40],但它的缺点是 MATI 的估计值很小时,需要很大的网络吞吐量方可确保系统稳定。