

基于新型Smith预估补偿的 网络控制系统

杜 锋 杜文才 著



科学出版社

基于新型 Smith 预估补偿的 网络控制系统

杜 锋 杜文才 著

科 学 出 版

北 京

内 容 简 介

本书是作者多年来研究网络控制系统时延补偿方法的概括与总结. 针对网络控制系统中的随机、时变和不确定性网络时延, 本书以作者提出的新型 Smith 预估器时延补偿方法为基础, 深入研究了常规 PID 控制、非线性 PID 控制、模糊自适应 PID 控制、模糊免疫 PID 控制、RBF 神经网络控制、CMAC 神经网络控制、广义预测控制等控制方法对网络时延的补偿效果. 其研究的网络结构涉及径直结构、分层结构和网络化串级控制系统结构, 涉及单回路网络控制系统和多回路复杂网络控制系统. 采用的网络涉及有线与无线网络、异构网络以及有线与无线混杂的网络. 最后介绍网络控制系统的仿真软件 TrueTime 1.5.

本书可作为高等院校控制理论与控制工程、系统工程、检测与自动化、通信工程、信息与计算科学、运筹学与控制论、计算机应用技术等相关专业的高年级本科生和研究生的专业参考书, 也可供高等院校与科研院所从事网络控制系统研究的教师和科研人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

基于新型 Smith 预估补偿的网络控制系统 / 杜锋, 杜文才著.

—北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-034864-7

I. ①基… II. ①杜… ②杜… III. ①计算机网络-自动控制系统
IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 128817 号

责任编辑: 张海娜 潘继敏 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

骏 杰 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 6 月第一次印刷 印张: 11 1/4

字数: 212 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

网络控制系统(networked control systems, NCS)是集计算机技术、网络通信和控制技术于一体的新型交叉学科,是当今网络通信与控制理论研究领域中备受关注的国际前沿性课题之一,同时也是近年来大规模广域工业系统中为提高生产运行的技术经济性而进行的前沿性研究的一项重要课题。

网络控制系统可实现复杂大系统及远程控制、节点资源共享、增加系统柔性和可靠性,同时使得系统的分析和设计变得异常复杂。当传感器、控制器和执行器通过网络交换数据时,可能存在多包传输、多路径传输、数据碰撞、网络拥塞甚至连接中断等现象,导致一系列亟待研究和解决的特殊问题。例如,不确定数据传输时延、数据丢包与时序错乱等现象,使得网络控制系统丧失定常性、完整性、因果性和确定性。网络时延可降低系统的控制性能质量,甚至引起系统不稳定,传统的控制理论难以直接用于网络控制系统的分析与设计。目前国内外对于网络控制系统的理论研究滞后于网络控制系统的实际应用状况,迫切需要发展与网络控制系统相适应的分析与设计理论,并加强对其理论的研究工作。

近几年来,随着网络控制系统研究成果的不断涌现,国内外很多大学和科研院所都有从事网络控制系统研究的科研团队,相关书籍也陆续出版,部分高校已经在研究生中开设有关网络控制系统的学习课程。但是,从系统结构上分析和设计网络控制系统时延补偿与控制的书籍并不多见。本书从网络控制系统时延补偿方法“可实现化”的角度出发,从系统结构上研究时延补偿与控制的理论与方法,提出解决网络控制系统时延“测不准”难题的新方法与新思路。

本书从系统性、实用性、可读性和新颖性角度编写内容,并有很多仿真研究实例,力求成为既介绍原理分析,又兼顾研究方法与研究思路的网络控制系统参考书。

本书主要内容源于作者多年来从事网络控制系统理论研究和工程实践的积累,全书共 14 章。第 1 章介绍网络控制系统的研究状况、基本概念及系统组成;第 2 章介绍网络时延的组成、测量方法及网络节点的时序分析;第 3 章介绍经典 Smith 预估器原理及研究状况;第 4 章分析网络控制系统典型结构及存在问题,提出时延补偿的研究思路与研究方法;第 5 章提出针对随机、时变或不确定性网络时延的新型 Smith 预估器(一)结构;第 6 章对基于新型 Smith 预估器(一)结构的有线与无线网络控制系统进行仿真研究;第 7 章提出被控对象预估模型与真实模型之间存在较大偏差时的新型 Smith 预估器(二)结构;第 8 章提出针对真实被控对

象模型不完全确知时的新型 Smith 预估器(三)结构;第 9 章对基于新型 Smith 预估器(三)结构的有线与无线网络控制系统进行仿真研究;第 10 章提出四种针对网络化串级控制系统网络时延动态补偿的新型 Smith 预估器结构;第 11 章对内和外回路网络为同一网络构成的多回路网络控制系统进行仿真研究;第 12 章对内和外回路网络为有线(无线)异构网络构成的网络化串级控制系统进行仿真研究;第 13 章对内和外回路网络为有线与无线构成的混杂网络化串级控制系统进行仿真研究;第 14 章对网络控制系统仿真软件 TrueTime 1.5 进行介绍。

本书涉及的科研成果是作者在国家自然科学基金、海南省自然科学基金、海南大学“211 工程”重点特色学科“海洋通信与信息岛”建设,以及海南省重点学科“通信与信息系统”建设等项目资助下取得的。在本书的编写过程中,得到了中国科学院院士周巢尘的支持与指导,同时还得到了科学出版社给予的大力支持,使我有机会把研究成果加以归纳和总结出版,在此深表谢意。最后,要衷心感谢我的导师中国工程院院士钱清泉把我引入网络控制系统时延补偿与控制理论的研究领域,并一直工作至今。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,殷切希望广大读者批评指正。

杜 锋

2012 年 5 月于海南大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 网络控制系统研究意义	1
1.2 网络控制系统基本问题	2
1.3 网络控制系统研究现状	6
1.4 本书涉及的网络拓扑结构	15
1.5 本书涉及的网络协议	17
1.6 本书使用的仿真软件	18
1.7 内容安排	18
1.8 本章小结	19
参考文献	19
第 2 章 网络时延及其测量	28
2.1 网络时延的组成与分析	29
2.2 测量方法	32
2.3 本章小结	33
参考文献	33
第 3 章 Smith 预估补偿	34
3.1 引言	34
3.2 Smith 预估补偿原理	34
3.3 Smith 预估器研究现状	35
3.4 本章小结	37
参考文献	37
第 4 章 网络时延补偿研究思路与方法	38
4.1 引言	38
4.2 网络控制系统存在的问题	38
4.3 解决时延补偿问题的思路与方法	39
4.3.1 实现目标	39
4.3.2 需解决的关键科学问题	40
4.3.3 思路与方法	40
4.4 本章小结	41

第 5 章 新型 Smith 预估器(一)	42
5.1 引言	42
5.2 控制器端的 Smith 预估器	43
5.3 新型 Smith 预估器(一)技术路线	45
5.3.1 被控对象模型参数完全匹配	45
5.3.2 被控对象模型参数不完全匹配	46
5.4 新型 Smith 预估器(一)结构讨论	47
5.5 本章小结	47
参考文献	47
第 6 章 基于新型 Smith 预估器(一)的网络控制系统仿真	49
6.1 引言	49
6.2 PI 控制的网络控制系统	49
6.2.1 仿真设计	49
6.2.2 仿真研究	50
6.2.3 结果分析	55
6.3 广义预测控制的网络控制系统	56
6.3.1 控制算法	57
6.3.2 仿真设计	57
6.3.3 仿真研究	58
6.3.4 结果分析	60
6.4 PI 控制的无线网络控制系统	61
6.4.1 仿真设计	61
6.4.2 仿真研究	61
6.4.3 结果分析	65
6.5 模糊免疫控制的无线网络控制系统	66
6.5.1 控制原理	66
6.5.2 仿真设计	68
6.5.3 仿真研究	68
6.5.4 结果分析	70
6.6 本章小结	71
参考文献	71
第 7 章 新型 Smith 预估器(二)	72
7.1 引言	72
7.2 新型 Smith 预估器(二)技术路线	72
7.2.1 被控对象模型参数完全匹配	73

7.2.2 被控对象模型参数不完全匹配	74
7.3 本章小结	74
第8章 新型 Smith 预估器(三)	75
8.1 引言	75
8.2 被控对象端的 Smith 预估器	75
8.3 新型 Smith 预估器(三)技术路线	76
8.4 本章小结	78
参考文献	78
第9章 基于新型 Smith 预估器(三)的网络控制系统仿真	79
9.1 引言	79
9.2 PI 控制的网络控制系统	79
9.2.1 仿真设计	79
9.2.2 仿真研究	80
9.2.3 结果分析	83
9.3 RBF 神经网络控制的网络控制系统	84
9.3.1 控制原理	84
9.3.2 仿真设计	86
9.3.3 仿真研究	87
9.3.4 结果分析	91
9.4 非线性 PID 控制的无线网络控制系统	92
9.4.1 控制原理	92
9.4.2 仿真设计	94
9.4.3 仿真研究	94
9.4.4 结果分析	97
9.5 本章小结	98
参考文献	98
第10章 基于新型 Smith 预估器的网络化串级控制系统	99
10.1 引言	99
10.2 问题描述	100
10.3 技术路线	103
10.3.1 方案 I	103
10.3.2 方案 II	106
10.3.3 方案 III	107
10.3.4 方案 IV	108
10.4 方案拓展	110

10.4.1 方案 I 拓展	110
10.4.2 方案 IV 拓展	110
10.5 本章小结	112
参考文献	112
第 11 章 多回路网络控制系统仿真	114
11.1 引言	114
11.2 PI 控制的有线多回路网络控制系统	114
11.2.1 仿真设计	114
11.2.2 仿真研究	115
11.2.3 结果分析	119
11.3 PI 控制的无线多回路网络控制系统	120
11.3.1 仿真设计	120
11.3.2 仿真研究	121
11.3.3 结果分析	124
11.4 本章小结	125
第 12 章 异构网络控制系统仿真	126
12.1 引言	126
12.2 模糊控制的有线异构网络控制系统	126
12.2.1 控制原理	126
12.2.2 仿真设计	127
12.2.3 仿真研究	128
12.2.4 结果分析	132
12.3 CMAC 控制的无线异构网络控制系统	133
12.3.1 控制原理	133
12.3.2 仿真设计	134
12.3.3 仿真研究	135
12.3.4 结果分析	138
12.4 本章小结	139
参考文献	139
第 13 章 混杂网络控制系统仿真	140
13.1 引言	140
13.2 模糊免疫控制的混杂网络控制系统	140
13.2.1 仿真设计	140
13.2.2 仿真研究	141
13.2.3 结果分析	145

13.3 本章小结.....	146
第 14 章 TrueTime 1.5 仿真软件	147
14.1 引言.....	147
14.2 TrueTime 工具箱	147
14.3 TrueTime 1.5 安装	149
14.4 有线网络控制系统仿真实例.....	149
14.4.1 系统组成	149
14.4.2 有线网络模型	149
14.4.3 传感器节点	151
14.4.4 控制器节点	153
14.4.5 执行器节点	155
14.4.6 干扰节点	156
14.4.7 仿真结果	157
14.5 无线网络控制系统仿真实例.....	157
14.5.1 系统组成	159
14.5.2 无线网络模型	159
14.5.3 传感器/执行器节点	160
14.5.4 控制器节点	164
14.5.5 仿真结果	167
14.6 本章小结.....	167
参考文献.....	168

第 1 章 绪 论

1.1 网络控制系统研究意义

随着控制、网络及通信技术的发展与相互渗透,控制系统的结构越来越复杂,空间分布越来越广泛,对系统控制性能质量的要求也越来越严格.网络控制系统(networked control systems, NCS)^[1~3],以及网络化串级控制系统(networked cascade control systems, NCCS)^[4~10]是集计算机技术、网络通信与控制技术于一体的新型交叉学科,是当今网络通信与控制理论研究领域中备受关注的国际前沿性课题之一^[11,12].同时,也是近年来大规模广域工业系统中为了提高生产运行的技术经济性而进行的前沿性研究的一项重要课题,对于控制系统的学科领域和国民经济的发展具有重要的理论意义和实用价值.

NCS 的研究起始于 20 世纪 80 年代末期,文献[13]是关于集成通信与控制系统(integrated communication and control systems, ICCS)的研究.90 年代以来, NCS 以及 NCCS 已迅速应用于复杂工业过程控制、电力系统、石油化工、国防军事、机器人、轨道交通、航空航天、环境监测、海洋信息遥测、海洋地形地貌勘探等多个领域^[14~22].

NCS 以及 NCCS 可实现复杂大系统及远程网络控制,实现网络资源共享,增加系统柔性和可靠性.同时,也使系统的分析和设计变得异常复杂^[23].由于网络带宽有限并为系统各节点所共享,当传感器、控制器和执行器通过网络交换数据时,存在多包传输、多路径传输、数据碰撞、网络拥塞、连接中断等现象是不可避免的^[24],导致 NCS 以及 NCCS 产生一系列亟待研究和解决的特殊问题.例如,不确定的数据传输时延、数据丢包与时序错乱等,使得 NCS 以及 NCCS 丧失了定常性、完整性、因果性和确定性^[25].网络时延的存在可降低系统的控制性能质量,甚至引起系统不稳定^[26,27],传统的控制理论已难以直接用于 NCS 以及 NCCS 的分析与设计中.目前,国内外对于 NCS 以及 NCCS 的研究状况是理论研究严重滞后于 NCS 以及 NCCS 的实际应用现状.因而,迫切需要加强对其理论的研究工作^[28].

通过对 NCS 以及 NCCS 时延补偿等问题的系统、深入地研究,建立一套完整的 NCS 以及 NCCS 时延分析与补偿的综合理论体系,可以完善 NCS 以及 NCCS 的理论框架,丰富 NCS 以及 NCCS 的理论内容,可为 NCS 以及 NCCS 的工业过程控制的实际应用奠定坚实的理论基础,为实际工业过程控制中 NCS 以及 NCCS 的分析与综合提供重要的理论指导.因此,研究 NCS 以及 NCCS 的时延补偿、稳定性

及性能分析等问题,具有极其重大的理论研究价值与现实意义.

NCS 以及 NCCS 的发展顺应了计算机、控制理论和网络技术融合的趋势,代表了下一阶段信息革命的发展方向. 它的出现将促进控制理论与技术的发展,在实践上将能够解决复杂大系统控制和远程实时控制中遇到的一些难题;在理论上能够促进控制、计算机和通信技术等多门学科的交叉与渗透,使控制理论和技术进入一个崭新的阶段. 可以预计,随着 NCS 以及 NCCS 的实际应用与推广的不断增加,必将深刻地影响和推动着控制理论及其应用的发展.

随着对网络控制系统研究的不断深入,必将对我国的能源、交通、环境保护、航空航天事业、工业自动化、军事现代化和信息化的建设与发展产生积极的推动作用和深远的影响.

1.2 网络控制系统基本问题

虽然对 NCS 的研究已经取得了一些成果,但到目前为止,还没有形成一套成熟和完整的理论与方法体系. 由于 NCS 本身具有网络时延、数据包的时序错乱以及数据包丢失等特点,传统控制理论在 NCS 中无法直接使用. 要研究 NCS 就必须发展与 NCS 相适应的控制理论与控制方法,发展与 NCS 相适应的控制理论和控制方法就必须明确 NCS 中的一些基本概念与基本问题. 就 NCS 中的一些基本问题叙述如下.

1. 通信协议

在 NCS 中,通信网络主要是控制网络与 Internet 的集成. 控制网络主要由工业以太网、现场总线或两者结合所组成.

通常,按网络类型和媒体访问控制 (medium access control, MAC) 方式划分,控制网络主要有随机访问 (random access) 和轮询服务 (cyclic service) 两大类.

在随机访问网络中,节点间的通信采用载波监听多路访问 (carrier sense multiple access, CSMA) 协议. 例如,以太网 (Ethernet) 采用符合 IEEE 802.3 标准的带有冲突检测的载波监听多路访问协议 CSMA/CD (collision detection); 无线以太网采用符合 IEEE 802.11b/g (WLAN) 标准的带有冲突检测的载波监听多路访问协议 CSMA/CD; 无线传感器采用符合 IEEE 802.15.4 (ZigBee) 标准的网络; CAN bus (controller area network) 采用的是带有信息优先级仲裁的载波监听多路访问协议 CSMA/AMP (arbitration on message priority).

在轮询服务网络中,网络节点间的通信通常采用令牌传递 (token passing, TP) 方式. 例如,令牌总线 (IEEE 802.4) 标准和令牌环网 (IEEE 802.5 标准). 采用令牌方式的主要是 ControlNet, 如用于过程控制的现场总线 Profibus, 用于工厂设

备连接的现场总线 FIP 和 P-NET 等。

采用不同通信协议的通信网络有着不同的通信特征,从而使 NCS 具有不同的特性,如时延特性、节点传输信号的优先级等。这些特性都将直接影响整个系统的分析与设计,进而影响整个系统的控制性能。

2. 驱动方式

传感器、控制器与执行器的工作方式可以分为时间驱动和事件驱动:

- (1) 时间驱动是指网络节点定时对数据进行采样;
- (2) 事件驱动是指网络节点在一个特定的事件发生时立即开始工作。

在 NCS 中,传感器一般采用时间驱动,控制器和执行器采用事件驱动。

当控制器或执行器采用事件驱动时,具有以下优点:

- (1) 避免采用时间驱动时的数据等待被采样时间,减少了网络时延;
- (2) 避免采用时间驱动时与传感器时钟同步的困难;
- (3) 避免采用时间驱动时容易出现的无效采样或丢包,提高了反馈数据的利用率,降低了对网络通信带宽的要求。

但是,事件驱动相比于时间驱动也有缺点:

- (1) 事件驱动带来了随机采样和随机时延;
- (2) 事件驱动比时间驱动更难实现,通常需要网络通信协议的支持。

3. 时钟同步

当传感器为时间驱动、控制器或执行器也采用时间驱动时,时间驱动的点间应保证时钟信号的同步。

时钟同步可分为硬件同步和软件同步两种方式:

- (1) 硬件同步一般是通过实际介质(如传输导线)传递同步时钟信号,对于分布在不同地理位置的各网络节点,硬件同步难于实现且造价高;
- (2) 软件同步一般是通过网络广播具有高优先级的同步时钟信号,软件同步是常用的同步方式。

4. 多率采样

多率采样是指控制系统中,两个或两个以上的采样器以不同的采样周期进行采样。

由于 NCS 具有节点分散化,控制回路复杂化和功能多样化等特点。多个传感器采用相同的采样周期进行采样,已不能满足系统功能的需求,也不符合实际系统情况。此外,采样器和保持器的采样周期越小,系统得到的性能也越好,但 A/D 和 D/A 转换速度越快,其成本要求就越高。对于具有不同频率信号的系统,为了获得

较好的性能,同时又节约硬件成本,解决方案是系统采用多采样率,即各子系统根据其功能需求采用不同的采样率.

5. 网络时延

在 NCS 中,通信网络的存在,信息的传输要分时占用网络通信线路,网络的承载能力和通信带宽有限,必然会造成信息的冲撞、重传等现象的发生.同时采样、量化、编码与解码、等待传递的时间使得控制系统的信息在网络传输时产生时延,这个时延称为网络时延.

时延的存在将降低系统的控制性能,甚至引起系统不稳定,使得系统的分析变得非常复杂.虽然时延系统的分析和建模近年来取得很大进展,但在 NCS 中,可能存在多种不同性质的时延(常数、有界、随机或时变等),使得现有的方法一般不能直接应用^[29].

从控制的角度看,时延将使系统的相位滞后,大大降低控制系统的性能质量.例如,使系统的上升时间增大、超调量增大、稳定时间变长等,甚至导致系统不稳定.即使系统仍然保持稳定,稳定区域也会显著减小.从调度的角度看,时延将使信息不能准时到达,丢失截止期,甚至产生多米诺效应.

网络时延的存在还衍生两个基本问题:

(1) 样本拒绝(或多采样).当两个或多个传感器样本数据在同一采样间隔内到达控制器时,至少要丢弃一个样本.

(2) 空采样.在一个采样周期内,没有数据到达控制器或执行器,那么控制器或执行器将继续采用旧的采样数据.

因此,如果在系统设计时不考虑这些因素,就达不到期望的控制要求.

6. 时序错乱

在网络环境下,被传输的数据流经众多计算机和通信设备,且路径非唯一,必然会导致数据包的时序错乱问题.

在 NCS 中,单包传输时,数据包时序错乱是指各个数据包到达接收端的顺序与发送时的顺序不同;多包传输时,数据包时序错乱是指一个完整的数据被封装成多个数据包传输,多个数据包到达接收端的顺序与发送时的顺序不同.

节点冲突、网络拥塞、连接中断和多路径传输机制等因素,是造成数据包时序错乱的主要原因.时序错乱的结果将导致数据传输率降低,间接增加网络时延.

7. 单包传输与多包传输

单包传输是指传感器(或控制器)的数据作为一个数据分组同时发送.

多包传输是指传感器(或控制器)的数据通过不同的数据分组传送。

采用多包传输是由于数据分组大小的限制,报文分组交换网络在一个数据中只能携带有限的数据,这就使得数据不得不分成多个包进行传输。另外,在 NCS 中,传感器、控制器和执行器分布在较大的物理区域,不可能将数据放入一个包中。多个数据包传输时,由于节点冲突、网络拥塞、连接中断和多路径传输机制等原因,多个数据包不可能同时到达。这将增加接收端数据处理时间,从而间接增加网络时延。

不同的网络适合于不同类型的传输方式,如 Ethernet 采用单包传输,而 DeviceNet 则采用多包传输。由于数据包传输方式的不同,系统分析与设计的方法将有所不同^[30,31]。

8. 数据丢包

在 NCS 中,数据包的丢失可划分为两类:主动丢包和被动丢包。

(1) 主动丢包是指在一些网络的拥塞控制算法里,有时采用有目的丢掉一部分数据包来防止网络阻塞,这些数据包往往是一些非实时数据;

(2) 被动丢包是指当数据包超过了允许重发的时限而发生的丢包。

丢包对系统的性能是一柄双刃剑。一方面,对于主动丢包,丢掉过时的信息,始终发送最新的数据,不进行信息的重发,有利于最新信息的利用,保证信息的实时性;另一方面,被动丢包使数据和通信的时延加剧。

一般而言,反馈控制的被控对象只能容忍一定比例的丢包,对于本来没有丢包的系统当丢包率达到一定值时,系统将变得不稳定^[32~35]。

9. 网络拥塞

当网络中存在过多的数据包时,超负荷工作的网络性能就会急剧下降,这种现象称为网络拥塞(congestion)。

拥塞导致的直接后果是数据包丢失率增加,端到端的数据传输时延增大,严重时导致整个系统瘫痪。拥塞的根本原因是节点提供给通信网络的负载超过网络资源的容量和处理能力。

在 NCS 中,采用 TOD(try-once-discarded)数据传输技术,可保证设备接收到的数据是最新数据,待传输的数据在传输过程中只发送一次,传输未成功便被丢弃,从而大大降低网络拥塞发生的概率。

10. 网络调度

在 NCS 中,调度是指系统节点在共享网络中发送数据出现碰撞时,规定节点的优先发送次序、发送时刻和时间间隔。

网络调度的目的是尽量避免冲突和拥塞现象的发生,从而减少网络时延和数据包丢失率.例如,当多个传感器通过共享网络传输数据发生冲突时,网络调度规定各个传感器访问网络的优先次序、发送时刻和发送时间间隔,使整个系统达到预期的性能指标.

目前,NCS 的调度方法主要包括基于优先级的调度方法、基于节点发送时间间隔的调度方法以及基于死区的调度方法等.

基于优先级的调度方法主要有静态调度(static scheduling)和动态调度(dynamic scheduling):

(1) 在静态调度(又称离线调度)中,各节点任务的发送是预先确定的,如时限、计算时间、优先权关系和任务的释放时间等.如 RM(rate monotonic)及其衍生算法属于静态调度法.静态调度法是缺省的调度算法,在任务执行之前就已经确定了各个任务的优先级,不会随时间变化.利用静态调度算法可以设置某些节点在其他节点之前多次访问网络.

(2) 动态调度法(又称在线调度)是在 NCS 运行中,决策网络资源的分配,根据任务的某些特性随时间的变化,动态地调整任务之间数据的发送顺序.如 EDF(earliest deadline first)是最优的动态调度算法.TOD 技术与优先级控制技术相结合,可以实现动态的调度策略.

在网络资源有限的条件下,动态调度比静态调度更能有效利用网络^[36~39].

1.3 网络控制系统研究现状

由于网络的承载能力和通信带宽有限,信息在传输过程中不可避免地存在数据丢包和网络时延^[1,22,28,40].受网络采用的通信协议、网络负载状况、网络传输速率和数据包大小等诸多因素的影响,节点之间数据包的传输时延呈现出或固定、或随机、或有界、或无界的特征^[41,42];相对于采样周期的长度,或为长时延(大于一个采样周期)^[43,44],或为短时延(小于一个采样周期)^[45]、或相继发生的时延、或相互独立的时延^[46]、或条件相关的时延^[47].网络时延的存在造成系统性能下降,甚至引起系统不稳定^[48],严重时可导致系统出现故障^[49].现有的方法一般不能直接应用于 NCS 中^[42],对于随机、时变或不确定网络时延的研究是 NCS 中的关键点和难点的问题.迄今为止,还没有一种网络时延模型可适用于大部分网络情况的分析与控制.

针对随机、时变和不确定的网络时延,国内外研究者提出了各种控制方法与解决方案,目的是为了减小时延的影响或对时延进行有效补偿,已取得了丰硕的成果^[1,26,43,44,50~52].

然而,针对工业过程控制中广泛存在的一类特殊的 NCS,即 NCCS 的分析和

综合还有待进行系统与深入地研究。

下面着重分析近年来 NCS 以及 NCCS 中时延的研究状况与发展动态。

1. 确定性控制研究方法

利用设置节点接收缓冲区与发送缓冲区,将随机、时变性时延转换为固定时延,采用确定性方法对系统进行分析与设计。

文献[53]利用接收缓存将时变时延转化为固定时延,并用于时延补偿控制。

文献[54]针对网络只存在于控制器和传感器之间的 NCS,利用缓存将网络时延转化为固定时延,设计了具有时延补偿功能的状态观测器。

文献[55]利用信息接收缓冲区将不确定的长时延转变成可在几个确定时延之间选择,而不是转变成一个固定的最大时延,降低了时延扩大化的程度。

文献[56]和[57]利用接收缓存将不确定性时延转化为固定时延,采用滑模变结构控制和预估控制,其结果可用于长时延的 NCS。

然而,上述方法带来的缺点是缓冲区的引入导致时延转化为最大时延,人为增大时延,用牺牲系统的灵敏度换取控制器对时延变化的鲁棒性。

2. 随机控制研究方法

假设网络时延特性服从某一概率分布或服从某已知规律,采用随机控制理论方法对系统进行建模、分析与控制。

文献[58]针对短时延且概率分布可由 Markov 链决定的 NCS,建立了离散时间模型,用随机控制理论和方法进行分析与设计。

文献[59]和[60]对长时延 NCS 提出了一种随机最优控制方案。

文献[61]和[62]研究了单包传输和 MIMO 的 NCS 建模和随机最优控制器。

文献[63]建立了随机长时延 NCS 的数学模型,设计了满足系统均方指数稳定和随机稳定的控制律。

文献[64]提出了长时延 NCS 的均方指数稳定条件,给出了具有一定性能指标的随机最优控制器。

文献[47]针对长时延的 NCS,把数字控制系统建成离散时间线性跳变系统模型。

文献[65]用 Markov 链来处理随机网络传输时延和数据丢包,但其方法的计算较为复杂,不便于实施。

文献[66]采用齐次 Markov 链描述网络时延,给出了镇定控制器的设计方法。

文献[67]基于动态规划和最优控制理论,得出了使系统均方指数稳定的控制律。

文献[68]针对一类具有随机时延的 NCS 进行稳定性分析。

然而,随机控制方法利用了随机控制理论,其前提是假设网络时延的概率分布