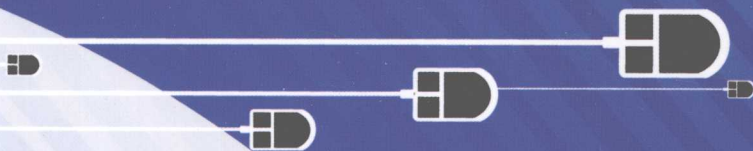




网络控制系统 分析与控制

邱占芝 张庆灵 杨春雨◎著



科学出版社

www.sciencep.com

网络控制系统分析与控制

邱占芝 张庆灵 杨春雨 著

本书的出版和所研课题工作得到如下资助:

辽宁省自然科学基金(20072157,12050770)

辽宁省教育厅计划(20060107)

大连市人民政府资助出版

大连交通大学资助出版

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书阐述了网络控制系统存在的问题、研究现状与发展趋势;深入研究了网络控制系统中时延、数据包丢失产生的原因;建立了针对不同控制目标的网络控制系统模型;深入研究了系统的鲁棒控制、保性能控制和 H_∞ 控制方法;针对同时存在时延和数据包丢失的情况,建立了状态反馈和动态输出反馈网络控制系统的统一模型,研究了系统的指数稳定性和稳定条件;深入研究了被控对象为奇异系统的网络控制系统的建模、稳定性分析与控制方法;进一步展望了网络控制系统尚待研究的问题。

本书主要适合高等院校与科研院所从事网络控制研究的教师、科研人员、硕士与博士研究生等阅读参考。同时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、硕士和博士研究生的专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

网络控制系统分析与控制/邱占芝,张庆灵,杨春雨著. —北京:科学出版社,2009
ISBN 978-7-03-022895-6

I. 网… II. ①邱…②张…③杨… III. 计算机网络-自动控制系统-高等学校-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 135005 号

责任编辑:张扬 房阳/责任校对:鲁素

责任印制:钱玉芬/封面设计:王浩

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>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 2 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 2 月第一次印刷 印张:11 3/4

印数:1—3 000 字数:191 000

定价:39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

随着网络通信技术和计算机技术的高速发展,网络控制系统(networked control system, NCS)应运而生. NCS 以其资源共享、分布控制、智能维护等特点,充分体现了控制系统网络化、集成化、分布化及节点智能化的发展趋势. 当今,在发达国家尽管基于网络的控制系统的应用领域不断扩大,技术水平取得显著进展,但网络控制系统的技术体系和理论基础还没有形成. 在我国,研究网络化控制系统的控制理论和技术体系,既是关系到国家经济命脉和国防安全的战略性需求,也是提升国家工业基础水平、综合实力和自主创新能力的重要举措. 深入、系统地研究网络控制系统中的科学问题,有助于建立网络控制系统的控制理论与控制方法,推进控制与通信的一体化设计进程,形成集通信理论、计算机科学和控制科学于一体的综合学科体系.

目前,国内许多高等学校、科研院所,在网络控制领域的研究已取得丰硕的研究成果. 研究领域包括连续域、离散域和连续-离散混合域;研究对象包括线性系统、非线性系统和广义系统等;研究问题围绕 QoS、QoP 或兼顾 QoS 和 QoP 的控制与调度等综合问题;研究内容包括控制网络体系构架、各种数据传输技术、NCS 建模、稳定性分析与控制器设计、鲁棒控制、观测器设计、时延补偿控制、数据包丢失控制、应用层信息调度方法等. 但仍有下面的问题有待于进一步深入、系统地研究.

1) 广义网络控制系统的复杂性分析与控制

广义系统模型存在于大量的实际控制系统中,广义系统涵盖正常系统,并且具有许多正常系统所没有的特性,如脉冲特性、无因果性等. 被控对象为广义系统的 NCS 的控制理论与控制方法将变得更加复杂. 这种系统中包含着广义系统和网络控制系统的双重特性,广义系统的脉冲行为和网络控制系统的时延、丢包和扰动等不确定性因素的相互渗透和耦合,如何消除脉冲行为、克服时延和丢包对系统性能的影响,使系统的控制性能达到预期目标,将是一极大的挑战. 研究广义被控对象的 NCS 的控制理论与控制方法,对于丰富和完善系统化的控制理论体系具有重要的科学意义和潜在的应用价值.

2) 具有时变传输周期的 NCS 研究

大多数文献中传感器的采样周期是常数,然而在网络控制系统中,计算机负载的变化、网络的影响以及器件故障等因素会导致采样周期在某个理想周期左右波动,另外,外部干扰也会导致系统状态产生波动. 因此,如何合理地设计控制器,使得当出现外部干扰以及采样周期波动时系统仍保持良好的性能具有

十分重要的意义。

- 3) 多采样率 NCS 的研究
- 4) 具有时变、随机丢包率的 NCS 的研究
- 5) 基于网络的调度与控制的协调设计问题的研究
- 6) 实时信息调度方法的研究
- 7) NCS 的容错控制与故障诊断方法的研究
- 8) NCS 仿真实验平台的研究

网络控制系统既是一种优势强大、性能卓越、运行高效、维护方便的控制
系统,同时也是涉及多门学科、跨跃多个研究领域、凝聚多种技术手段、采用
多种研究方法的复杂系统。网络控制系统的研究将直接带动相关学科的交叉融
合,形成集通信理论、计算机科学和控制科学于一体的综合学科体系。

本书的内容,主要基于作者在东北大学攻读博士学位期间的博士课题研究
成果,并增添了 2006、2007 年两年陆续发表的学术论文。本书系统地阐述了基
于网络的控制系统存在的问题、考虑各种复杂因素的系统的建模、稳定性分析、
 H_∞ 控制、观测器设计等方法。全书共分 7 章,其中,第 1 章简要介绍 NCS 中
基本概念、术语和存在的主要问题、研究方法、研究现状以及本书的主要研究
成果。第 2 章介绍控制网络的含义及其分类、典型控制网络的通信方式、特性
和性能指标、NCS 中时延产生的原因、不同控制网络的时延特性及时延对系统
性能的影响。第 3 章针对传感器时钟驱动、控制器和执行器事件驱动的动态输
出反馈系统,研究了不确定时延不超过一个采样周期的 NCS 建模、稳定性分析、
对于扰动的 H_∞ 控制等问题以及对于不确定时延的 H_∞ 状态观测器设计方法和
基于状态观测器的 NCS 鲁棒镇定等相关问题。第 4 章研究具有控制输入约束的
NCS 建模和稳定性问题。第 5 章研究同时具有时延和数据包丢失的 NCS 建模
和稳定性问题,建立了状态反馈和动态输出反馈 NCS 的数学模型,给出了系统
的稳定性条件、系统稳定性与数据包丢失率上界的关系以及系统结构的关系
等。第 6 章基于广义被控对象,考虑不同时延特性、数据包丢失等情况,研究
了 NCS 的建模和稳定性等问题。第 7 章基于 Matlab/Simlink 平台,利用 TrueTime
实时仿真工具,探索网络通信模式、信息调度方法、数据通信率、数据包丢失
率、网络诱导时延、网络负载扰动等因素对系统稳定性的影响。

本书主要读者对象为高等院校与科研院所从事网络控制系统研究的教师、
科研人员、博士与硕士研究生等。本书可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、自动化、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、博士和硕士研究生的专业
参考书。

作者由衷地感谢中国科学院沈阳自动化研究所于海斌教授、大连理工大学

王伟教授和邵诚教授、大连海事大学徐进学教授、大连交通大学科技处孙占如处长的热情支持和推荐，使得本书得到出版基金资助。

在本书的出版过程中，得到了科学出版社张扬编辑的支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢！

近年来，关于网络控制系统的研究备受国内外学者的关注，在新理论与新技术方面，众多的学者进行了大量的研究工作，科研成果不断涌现。由于作者水平有限，书中不足之处和缺点在所难免，敬请专家和读者在阅读中不吝赐教，谢谢！

真诚感谢给予出版本书的所有关心、资助和支持的各位朋友！

作者：大连交通大学 邱占芝
东北大学 张庆灵、杨春雨
2008年12月

符 号 说 明

$\mathbf{R}$	实数域	$\mathbf{A}^T$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的转置
$\mathbf{C}$	复数域	$\mathbf{A}^{-1}$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的逆矩阵
$\mathbf{C}^-$	左半开复平面	$\mathbf{C}^+$	右半开复平面
$\mathbf{R}^n$	n 维实数向量域	$\lambda(\mathbf{A})$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的特征值集合
$\mathbf{R}^{m \times n}$	$m \times n$ 维实数向量域	$\lambda_{\max}(\mathbf{A})$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的最大特征值
$\in$	属于	$\lambda_{\min}(\mathbf{A})$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的最小特征值
$\notin$	不属于	$\mathbf{A} > 0$	矩阵 $\mathbf{A}$ 正定
$\Leftrightarrow$	等价于	$\equiv$	恒等于
$\mathbf{I}_n$	$n \times n$ 维单位矩阵	$\mathbf{A} < 0$	矩阵 $\mathbf{A}$ 负定
$\det$	行列式	$\mathbf{A} \geq 0$	矩阵 $\mathbf{A}$ 半负定
$\deg \det$	行列式的次数	$\text{rank}(\mathbf{A})$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的秩
$\forall$	所有的	$\text{diag}(\mathbf{A}, \mathbf{B})$	$\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 构成的对角矩阵
$G(s)$	传递函数	$(E, \mathbf{A})$	广义系统
$\cup$	并	$\sigma(\mathbf{A})$	矩阵 $\mathbf{A}$ 的极点域
$\cap$	交	$\subset$	包含于
$\delta(t)$	脉冲函数	$\mathbf{x}^T$	向量 $\mathbf{x}$ 的转置
$\mathbf{A}_d^T$ 或 $\mathbf{A}_d^T$	矩阵 $\mathbf{A}_d$ 的转置	$\mathbf{C}_p^h$	h 阶分段连续可导函数

目 录

前言

符号说明

第1章 绪论	1
1.1 研究的目的与意义	1
1.2 网络控制系统的基本问题	2
1.2.1 通信媒体类型及通信协议	3
1.2.2 节点的驱动方式	4
1.2.3 节点时钟同步方式	4
1.2.4 多采样率	5
1.2.5 网络诱导时延	5
1.2.6 单包传输和多包传输	5
1.2.7 数据包时序错乱	6
1.2.8 数据包丢失	6
1.2.9 数据滤除和空采样	6
1.2.10 网络调度	7
1.2.11 网络拥塞	8
1.2.12 网络性能指标和服务质量	9
1.3 网络控制系统研究的问题、方法与现状	10
1.3.1 控制网络体系构架	11
1.3.2 网络调度方法的研究	12
1.3.3 NCS 建模、稳定性与控制器设计	13
1.3.4 鲁棒控制与 H_2/H_∞ 控制	14
1.3.5 观测器设计	14
1.3.6 多包传输、数据包丢失的研究	15
1.3.7 容错控制与故障诊断	16
1.3.8 其他问题研究	17
1.3.9 NCS 仿真研究	17
1.4 NCS 需要研究的问题	18
1.5 本书主要研究成果	19
参考文献	20
第2章 控制网络技术与时延特性	25
2.1 控制网络及其分类	25
2.2 NCS 中典型控制网络	26

2.2.1 以太网	27
2.2.2 CAN bus	28
2.2.3 TP bus	28
2.2.4 工业以太网	29
2.2.5 ATM 交换网络	31
2.3 时延特性	32
2.3.1 时延产生的原因	32
2.3.2 时延特性分析	34
2.3.3 时延对系统性能的影响	35
2.4 章末小结	39
参考文献	39
第 3 章 动态输出反馈 NCS 的稳定性分析	40
3.1 动态输出反馈 NCS 建模	40
3.1.1 NCS 描述	41
3.1.2 系统建模	43
3.2 系统稳定性分析	46
3.2.1 定常时延 NCS 稳定性	46
3.2.2 不确定时延 NCS 的鲁棒稳定性	49
3.2.3 鲁棒控制律存在的条件	53
3.3 H_∞ 控制	54
3.3.1 H_∞ 次优控制	55
3.3.2 H_∞ 最优控制	61
3.4 基于观测器的 NCS 控制	63
3.4.1 状态观测器设计	63
3.4.2 H_∞ 状态观测器设计	65
3.4.3 基于观测器的 NCS 鲁棒稳定性	67
3.5 章末小结	71
参考文献	72
第 4 章 具有控制约束的 NCS 分析与控制	74
4.1 有界时延多输入多输出 NCS 分析与建模	74
4.1.1 状态反馈	75
4.1.2 动态输出反馈	76
4.2 时延相关稳定性	78
4.3 时延无关稳定性	82
4.4 不确定时延 NCS	84

4.5 章末小结	88
参考文献	88
第5章 数据包丢失 NCS 分析与控制	89
5.1 数据包丢失模型描述	89
5.2 有时延和数据包丢失的 NCS 建模	91
5.2.1 状态反馈	91
5.2.2 动态输出反馈	93
5.3 系统稳定性分析	95
5.3.1 指数稳定	95
5.3.2 指数稳定的容许数据包丢失率	98
5.4 状态反馈 NCS 指数稳定性	99
5.4.1 数据包丢失率约束的指数稳定性	100
5.4.2 状态反馈控制律存在的条件	106
5.5 动态输出反馈 NCS 指数稳定性	108
5.5.1 数据包丢失率约束的指数稳定性	109
5.5.2 控制律存在的条件	111
5.6 章末小结	113
参考文献	114
第6章 广义被控对象的 NCS 分析与控制	115
6.1 典型广义系统模型	115
6.2 广义系统基本特性	117
6.2.1 系统正则性	117
6.2.2 广义系统的等价表式	118
6.2.3 连续系统的状态响应	119
6.2.4 连续系统的能控性	119
6.2.5 连续系统的稳定性	120
6.2.6 广义系统的容许性概念	120
6.3 广义 NCS 分析与建模	120
6.3.1 传感器和控制器时钟驱动、异步采样的 MIMO 系统	120
6.3.2 短时延 NCS 建模	129
6.3.3 有时延和数据包丢失的 NCS 建模	132
6.3.4 有时延和数据包丢失的 NCS 统一模型	135
6.3.5 具有分布、有界时延的 NCS 建模	135
6.4 稳定性分析	136
6.4.1 时延相关稳定性	136

88	6.4.2 短时延 NCS 稳定性	141
88	6.4.3 短时延 NCS 控制律存在的条件	146
98	6.5 具有数据包丢失的广义 NCS 指数稳定性	151
98	6.5.1 状态反馈系统指数稳定性	151
10	6.5.2 动态输出反馈系统指数稳定性	156
10	6.6 章末小节	161
60	参考文献	161
	第 7 章 网络控制系统仿真	163
20	7.1 TrueTime 仿真器	164
20	7.1.1 基本概念	164
90	7.1.2 TrueTime 功能模块简述	165
101	7.1.3 TrueTime 的安装与配置	167
101	7.2 NCS 仿真分析	168
101	7.2.1 NCS 仿真模型的建立	169
101	7.2.2 具有时延的 NCS 仿真	170
111	7.2.3 具有时延和数据包丢失的 NCS 仿真	170
111	7.2.4 具有时延和扰动的 NCS 仿真	172
111	7.3 章末小结	174
111	参考文献	174

第1章 绪 论

1.1 研究的目的是意义

随着电子、通信和计算机技术的飞跃发展,智能化传感器、执行机构和驱动设备的诞生奠定了网络控制系统(networked control system,NCS)的物质基础,高速以太网和现场总线技术的不断发展和成功应用解决了NCS的可靠性和开放性问题,推动了NCS在航空航天、设备制造、过程控制、交通控制、经济管理、远程医疗以及危险、特殊环境等控制领域的广泛应用。NCS是通过网络将分布于不同地理位置的传感器、控制器和执行机构连接起来,形成的一种全分布实时反馈闭环控制系统。控制器通过网络与传感器和执行机构交换信息,并实现对远程被控对象的控制。NCS的优势在于可以实现资源共享和远程分布控制,系统构建模块化、集成化、成本低,故障诊断和维护方便、易扩展、灵活性强^[1]。NCS充分体现了控制系统网络化、集成化、分布化及节点智能化的发展趋势。然而,由于通信机制与通信协议的原因,以及网络的带宽有限且为系统中各节点所共享,当传感器、控制器和执行器通过网络交换数据时,往往出现数据多路径传输、多包传输、数据碰撞、网络拥塞、网络连接中断等现象,这使得网络控制系统不可避免地产生数据传输时延、数据包时序错乱、数据包丢失等问题。时延会降低控制系统的性能,严重时将使系统失稳。此外,在NCS中,时变传输周期、多率采样、节点驱动方式、时钟同步方式、信息调度算法、空采样等,将使闭环系统的性能结构发生改变。这些问题往往使得NCS丧失定常性、完整性、因果性和确定性^[2]。传统的控制理论和控制方法已不能直接应用于NCS的分析和设计。必须针对NCS的不同特性,重新评估和建立网络控制系统的控制理论和控制方法。

NCS是集通信网络和控制系統于一体的复杂的控制系统。在NCS的研究中,涉及控制论、计算机科学、信息论、机械电子工程、软件工程、可靠性理论等多种学科领域。其中,控制论、计算机科学和信息论是系统分析的理论基础,而机械电子工程、软件工程和可靠性理论则在工程实现中为设计方法提供指导^[3]。NCS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、多节点通信与控制的实时反馈控制系统。Murray等^[4]曾指出:控制、计算和通信的集成将是控制科学的一个重要发展方向,网络控制系统则正是这一发展方向的

具体体现。NCS 的研究是一个跨越多个学科的研究领域, NCS 的分析与设计不仅涉猎控制理论中离散、连续及混合等所有的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。NCS 的研究目标既包含设计合适的通信协议以保证通信网络的服务质量(quality of service, QoS), 还要设计先进的控制器以满足系统的性能指标(quality of performance, QoP)。因此, NCS 的研究是既具复杂性又富含挑战性的研究课题。

目前, 网络硬件和控制设备价格的日益下降以及软件业的蓬勃发展, 促进了网络控制系统的应用拓展到国民经济的各个领域。建立和完善系统化的网络控制理论和控制方法, 是迫在眉睫的大事, 也是时代的需求, 对网络控制系统的应用和维护具有十分重要的意义。

1.2 网络控制系统的基本问题

NCS 结构有两大类, 直接结构和分级结构^[5], 分别表示在图 1.1 和图 1.2 中。

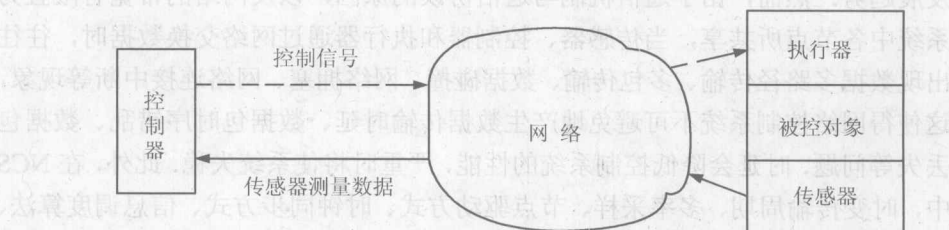


图 1.1 直接结构的 NCS

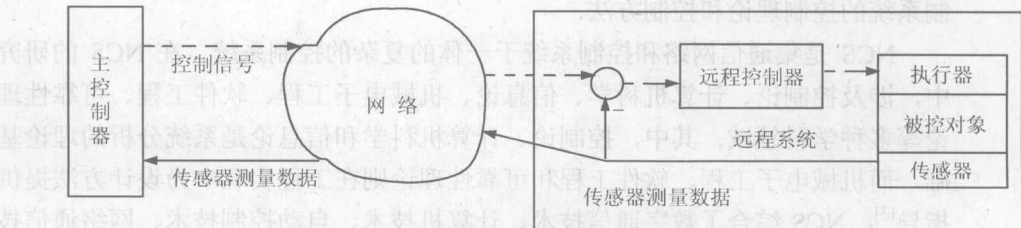


图 1.2 分级结构的 NCS

对于 NCS, 无论哪种结构, 总可以抽象表示成图 1.3 的结构形式。

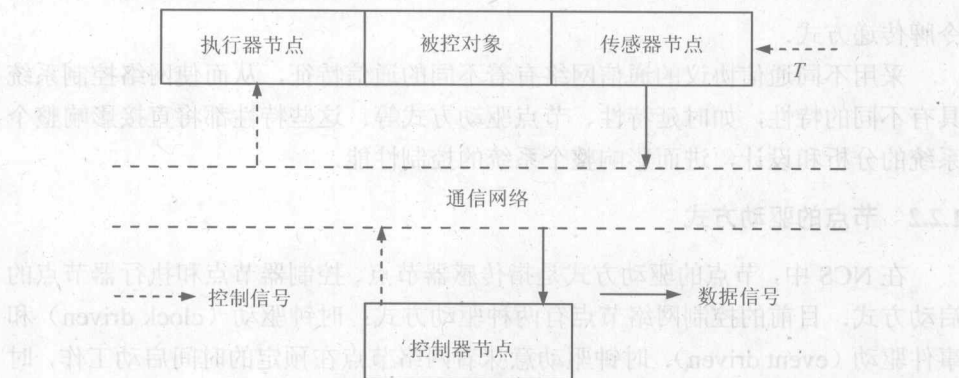


图 1.3 NCS 的结构

在图 1.3 中， T 表示采样周期，箭头方向表示信号流动方向。控制器通过网络实现对被控对象的控制。网络作为系统中信息交换的通信媒体，为系统中所有的传感器、执行器和控制器所共享。

网络控制系统与传统的点对点直接控制系统相比，系统结构的主要特征是传感器、控制器和执行器不是点对点的直接相连，而是通过公共网络（有线网络或无线网络）交换数据和控制信息，因而使得系统具有许多截然不同的特性。这些特性决定了 NCS 的控制理论和控制方法的研究，必须针对其特有的问题，采用有效的分析方法，制定可行的解决方案，设计正确的控制算法。

由于 NCS 中通信网络的存在，使得 NCS 的运行机制、分析与设计比传统的点对点直接控制系统更加复杂。NCS 中涉及的基本问题简述如下。

1.2.1 通信媒体类型及通信协议

在网络控制系统中，通信网络是控制系统的“中枢神经”，是系统中传感器、执行器和控制器等各节点所共享的公共网络。这一公共网络可以是有线网络、无线网络或混合网络。例如，可以是 Internet、无线局域网、传感器网络、工业以太网、现场总线或以太网与现场总线的结合等。按网络类型和媒体访问控制 MAC (medium access control) 方式划分，通信网络主要有随机访问 (random access) 和轮询服务 (cyclic service) 两大类^[6]。在随机访问网络中，节点间的通信采用载波监听多路访问 CSMA (carrier sense multiple access) 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)。CAN bus 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 TP (token passing) 方式，如令牌总线 (IEEE 802.4 标准) 和令牌环网 (IEEE 802.5 标准)。例如，用于过程控制的现场总线 Profibus 和用于工厂设备连接的现场总线 P-NET 等，均采用

令牌传递方式。

采用不同通信协议的通信网络有着不同的通信特征,从而使网络控制系统具有不同的特性,如时延特性、节点驱动方式等。这些特性都将直接影响整个系统的分析和设计,进而影响整个系统的控制性能。

1.2.2 节点的驱动方式

在 NCS 中,节点的驱动方式是指传感器节点、控制器节点和执行器节点的启动方式。目前的控制网络节点有两种驱动方式:时钟驱动(clock driven)和事件驱动(event driven)。时钟驱动意味着网络节点在预定的时间启动工作,时钟驱动可使网络节点周期地工作;而事件驱动则意味着网络节点在特定的事件发生时启动工作。例如,传感器一般为时钟驱动,即传感器按系统时钟,以一定周期采样被控对象的数据;控制器和执行器节点既可以时钟驱动,也可以事件驱动。控制器事件驱动指当接收到传感器节点传输来数据时立即进行控制计算等操作,而执行器节点事件驱动指接收到控制器传输来的控制信号,立即执行控制命令,驱动被控对象的执行机构,进行相应的调节操作。

对于具有多采样率的 NCS,若采用时钟驱动的 A/D 和 D/A 转换器,由于网络带宽的限制使得系统对信号的要求更高,过多的冗余信号将加重系统负荷,因而加重网络诱导时延、空采样和数据包丢失,从而使系统的控制性能恶化。而采用事件驱动则可以避免上述问题,对改善系统的控制性能具有实质性意义。采用事件驱动的多采样率理论的研究已经有问世。

控制器或执行器事件驱动的优点:节点接收到数据信息或控制信息后立即启动工作,一方面减少了等待采样时刻的等待时间,在一定程度上减少了网络时延;另一方面也避免了时钟驱动时节点间时钟同步难、空采样和数据丢失等问题。

控制器或执行器事件驱动的缺点:事件驱动不易实现,因而实际应用的支持事件驱动的控制网络较少。

采用 CSMA 协议的网络如 Ethernet、CAN 和 LonWorks 支持事件驱动。

采用 Token Passing 协议的 ControlNet 支持时钟驱动,如 Profibus 和 WorldFIP 等。

1.2.3 节点时钟同步方式

当传感器时钟驱动,控制器或执行器也为时钟驱动时,则时钟驱动的节日间时钟必须同步。时钟同步的方式有硬件同步和软件同步两种。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系统各节点,硬件同步难于实现且造价高,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。软件同步是通常采用的同步方式。

1.2.4 多采样率

多采样率是指控制系统中的两个或两个以上的采样器以不同的采样周期进行采样。由于网络控制系统具有节点分散化、控制回路复杂化和功能多样化的特点,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 转换越快,其成本越高。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,自然的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。

1.2.5 网络诱导时延

在 NCS 中,多个网络节点共享网络信道。由于网络带宽有限且网络中的数据流量变化不规则,当多个节点通过网络交换数据时,常常出现数据碰撞、多路径传输、连接中断、网络拥塞等现象。因而不可避免地出现信息交换时间延迟,这种由网络引起的信息交换时间延迟称为网络诱导时延(network-induced delay)。网络诱导时延是随机的、恒定的、有界的、还是不确定的,取决于通信网络的类型和采用的通信协议。

时延会降低系统的性能,使系统的稳定范围变窄,甚至使系统失稳。时延是 NCS 的分析和设计中不可忽略的重要因素。

1.2.6 单包传输和多包传输

在 NCS 中,数据是封装成一定大小的数据包进行传输的。单包传输是指 NCS 中传感器或控制器等待传输的单位信息被封装成一个数据包进行传输。多包传输是指 NCS 中传感器或控制器等待传输的单位信息被封装成多个数据包进行传输。系统采用单包传输或多包传输,取决于网络节点的各传感器所处的地理距离或控制网络中传输的数据包容量。当传感器节点的各个传感器位于较远的地理位置或等待传输的数据超过控制网络数据包的容量时,待传输数据必须封装成多个数据包传输。以太网的数据包容量为 1500 字节,适宜单包传输大批量数据。DeviceNet 的数据包容量为 8 字节,适合传输数据量小的需要快速传输的控制信息,在采用 DeviceNet 的网络中,传感器数据常常进行多包传输。而 ControlNet 的数据包容量为 504 字节。

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,从而间接地增加网络诱导时延。节点单包传输还是多包传输,系统的分析与设计方法将有所不同。

1.2.7 数据包时序错乱

在 NCS 中, 由于数据的多路径传输机制, 网络中同一节点发送到同一目标端的数据包不可能在相同的时间内到达接收端, 因而产生数据包先后顺序的错乱, 称为数据包时序错乱. 单包传输时, 数据包时序错乱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, 数据包时序错乱指一个完整的数据被封装成多个数据包传输, 这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, 间接地增加网络诱导时延.

1.2.8 数据包丢失

在采用串行通信方式的 NCS 中, 当传感器、控制器和执行器利用网络传输数据和控制信息时, 不可避免地出现数据包丢失 (packet dropout). 数据包丢失有两种情况: 一种是因传输通道为系统中各节点所共享, 并且网络带宽为有限, 在某一时间能够与控制器存取数据的传感器和执行器数目是有限的. 当负载较大时, 数据碰撞、网络拥塞和节点失败经常发生, 数据碰撞和节点失败将造成数据包丢失. 尽管大多数通信协议有重发机制, 但都重发在一定时间内未到达的数据包. 超过一定时间未到达的数据包将被丢弃. 另一种是在实时控制系统中, 往往是将一定时间未到达的数据包主动丢弃掉, 接着发送新数据, 以保证信号的及时更新和采样数据的有效性.

一个稳定运行的 NCS 容许有一定量的数据包丢失, 但数据包丢失率超过一定值时将使系统失稳^[7].

1.2.9 数据滤除和空采样

数据滤除 在 NCS 中, 当时变的网络诱导时延大于采样周期时, 在某一采样周期内, 控制器节点将会有多个采样数据到达, 此时仅是最新的数据被控制器使用, 其他数据将被丢弃掉, 这一现象称为数据滤除.

空采样 当 NCS 出现数据滤除现象, 或由于控制信号在网络中发生丢失或冲突时, 导致数据通信时延加大, 这必然会在某个周期内可能出现无采样数据到达的情况, 这种现象称为空采样.

数据滤除和空采样不仅会使系统性能下降, 而且形成控制信号失真, 产生高频噪声, 从而导致执行器无谓的消耗. 因此, 每个传感器节点的采样数据必须在下一个数据采样前到达相应的控制器节点, 即各节点的截止时间(期限) (deadline) 为相应控制闭环的一个采样周期^[8].