

通信受限系统性能 ▶▶▶ 极限与设计

詹习生 涂建 吴杰 张先鹤 著



科学出版社

通信受限系统性能极限与设计

詹习生 涂建 吴杰 张先鹤 著

国家自然科学基金青年项目 (61100076)

国家自然科学基金面上项目 (61471163) 资助

国家自然科学基金面上项目 (61370093)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了基于通信网络参数(网络时延、数据丢包、网络容量、网络带宽、编码解码和量化等)约束研究通信受限系统性能极限与有关性质。借助通信理论、频域分析方法、部分分解、互质分解和谱分解技术等,定量地揭示了通信受限系统性能极限与通信网络参数和控制对象固有特性间的内在联系,并进一步介绍了通信受限系统修改性能极限,为网络化控制系统设计(特别是网络参数和控制器设计)提供理论指导。

本书可作为从事自动控制和通信网络工作的科研人员、工程技术人员,以及高等院校自动化及其相关专业教师、高年级本科生和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

通信受限系统性能极限与设计/詹习生等著. —北京:科学出版社, 2016.6

ISBN 978-7-03-048417-8

I. ①通… II. ①詹… III. ①通信系统—受限控制
IV. ①TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 119787 号

责任编辑:赵艳春 余 丁 / 责任校对:蒋 萍

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

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>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:12

字数:240 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着计算机技术、通信技术和电子技术的不断进步和发展,系统设备成本逐年下降,网络通信能力飞速提高,网络共享资源不断丰富,越来越多的网络通信传输方式被应用到自动化和控制领域中,网络化控制系统(NCSs)随之应运而生。NCSs具有信息资源共享、成本低、可靠性高、易于维护与扩展、灵活性强等诸多优点。网络的介入导致通信时延、数据丢包、多包传输、通信带宽、量化、编解码等一系列新的问题,必须采用新方法、新理论来分析和研究NCSs。

NCSs已经成为国内外通信、计算机和控制等领域的研究热点。国内外许多学者主要从事NCSs的建模以及稳定性分析方面的研究。但是在实际应用NCSs的时候,不仅要考虑NCSs的建模及稳定性分析问题,还要考虑NCSs的性能。本书作者及团队近年来主要从事通信受限下NCSs性能极限与设计的研究,是国内较早研究通信受限下NCSs性能极限团队之一。采用频域方法研究得到的结果能够更好地反映NCSs性能极限与控制系统的固有特性(非最小相位零点和不稳定极点等)和通信网络参数之间的内在联系,这将为NCSs的设计提供重要理论指导。

本书主要分为九章。第1章介绍了NCSs的特点和基本问题,以及国内外研究现状。第2章介绍了通信带宽和数据丢包约束下NCSs稳定性条件,并且讨论了数据丢包约束下NCSs跟踪性能极限。第3章分别介绍了基于通信网络诱导时延约束连续和离散NCSs跟踪性能极限;并且讨论了基于诱导时延和带宽约束NCSs跟踪性能极限,进一步讨论了基于时延和信道能量受限下NCSs跟踪性能极限。第4章介绍了前向通道网络容量受限NCSs跟踪性能极限,以及单自由度控制器和双自由度控制器作用下反馈通道网络容量受限NCSs跟踪性能极限。第5章介绍了基于通信带宽约束和信道编码优化设计研究多输入多输出NCSs性能极限。第6章介绍了基于编码解码和白噪声影响NCSs跟踪性能极限,以及基于带宽和编码解码影响NCSs跟踪性能极限。第7章介绍了基于量化影响和信道能量受限多变量NCSs跟踪性能极限,并且讨论了基于量化和丢包约束的NCSs跟踪性能极限。第8章介绍了基于双向通道白噪声和编码约束多变量NCSs性能极限。第9章介绍了基于白噪声影响NCSs修改跟踪性能极限,包括单自由度和双自由度补偿器下控制系统修改跟踪性能极限。

本书由湖北师范大学詹习生、涂建、吴杰、张先鹤共同撰写完成。詹习生负责撰写第4~7章和第9章,涂建负责撰写第1~3章,吴杰和张先鹤负责撰写第8章。此外本书在撰写过程中得到华中科技大学关治洪教授的大力帮助,湖北师范大学姜晓伟、杨青胜、高红亮和吴博参与了编辑等大量工作。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，包括国家自然科学基金青年项目“多变量多通道网络化系统性能极限与设计”（编号：61100076）、国家自然科学基金面上项目“基于 QoP 与 QoS 融合通信网络系统优化设计”（编号：61471163）、国家自然科学基金面上项目“复杂欠驱动多主体网络的多协同与博弈优化算法设计与分析”（编号：61370093）。在此一并表示感谢。

书中难免有不妥和错误之处，恳请广大读者予以批评指正。

作 者

2016 年 3 月于湖北师范大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 控制系统的性能极限	2
1.3 网络化控制系统的特点及基本问题	4
1.3.1 网络化控制系统的特点	4
1.3.2 网络化控制系统基本问题	6
1.4 国内外研究概况	7
1.5 本书的主要内容	10
参考文献	11
第 2 章 基于数据丢包网络化控制系统的稳定性及性能极限	17
2.1 引言	17
2.2 基于数据丢包的网络化控制系统稳定性分析	18
2.2.1 问题描述	18
2.2.2 网络化控制系统稳定性分析	19
2.2.3 数值仿真	22
2.3 基于数据丢包的网络化控制系统性能极限	23
2.3.1 问题描述	23
2.3.2 数据丢包下网络化控制系统跟踪性能极限与设计	24
2.3.3 数值仿真	28
2.4 本章小结	29
参考文献	30
第 3 章 基于诱导时延约束网络化控制系统性能极限	32
3.1 引言	32
3.2 基于诱导时延网络化控制系统性能极限	32
3.2.1 问题描述	32
3.2.2 基于前向通道诱导时延网络化控制系统性能极限	33
3.2.3 基于反馈通道诱导时延离散系统性能极限	36

3.2.4	仿真实例分析	40
3.3	基于网络时延和数据丢包约束网络化控制系统性能极限	41
3.3.1	问题描述	41
3.3.2	不考虑信道输入能量受限下的性能极限	43
3.3.3	考虑信道输入能量受限下网络化控制系统性能极限	46
3.3.4	数值仿真	49
3.4	基于网络带宽和时延约束网络化控制系统性能极限	52
3.4.1	问题描述	52
3.4.2	反馈通道中存在网络诱导时延及带宽限制	54
3.4.3	前向通道存在网络诱导时延及反馈通道存在带宽限制	57
3.4.4	仿真分析	59
3.5	基于时延和信道能量受限网络化控制系统性能极限	60
3.5.1	问题描述	60
3.5.2	基于通信时延和信道能量受限系统性能极限	62
3.5.3	仿真分析	66
3.6	本章小结	67
	参考文献	68
第 4 章	基于网络容量约束网络化控制系统性能极限	70
4.1	引言	70
4.2	网络容量受限下网络化控制系统性能极限	70
4.2.1	问题描述	70
4.2.2	基于网络容量约束网络化控制系统性能极限	72
4.2.3	仿真分析	76
4.3	基于信噪比约束网络化控制系统性能极限	77
4.3.1	问题描述	77
4.3.2	基于 SNR 约束的单自由度跟踪性能极限	80
4.3.3	基于 SNR 约束的双自由度性能极限	81
4.3.4	数值仿真	85
4.4	本章小结	86
	参考文献	86
第 5 章	基于带宽约束网络化控制系统性能极限	87
5.1	引言	87
5.2	问题描述	87
5.3	基于通信带宽约束和编码设计性能极限	90

5.4 数值仿真	96
5.5 本章小结	98
参考文献	98
第 6 章 基于编码约束网络化控制系统性能极限	99
6.1 引言	99
6.2 基于编码和白噪声约束下网络化控制系统性能极限	99
6.2.1 问题描述	99
6.2.2 单自由度控制器下网络化控制系统性能极限	101
6.2.3 双自由度控制器下网络化控制系统性能极限	105
6.2.4 仿真分析	110
6.3 基于编码和带宽约束网络化控制系统性能极限	111
6.3.1 问题描述	111
6.3.2 带宽约束和编码影响多变量系统性能极限	112
6.3.3 双通道带宽约束和编码影响系统性能极限	118
6.3.4 数值仿真	120
6.4 本章小结	123
参考文献	123
第 7 章 基于量化影响网络化控制系统性能极限	125
7.1 引言	125
7.2 量化影响下的网络化控制系统跟踪性能极限	125
7.2.1 问题描述	125
7.2.2 基于量化影响的多变量网络化控制系统跟踪性能极限	128
7.2.3 基于量化和能量受限下多变量网络化控制系统性能极限	132
7.3 基于量化和丢包约束的网络化控制系统性能极限	136
7.3.1 问题描述	136
7.3.2 基于量化和丢包限制网络化控制系统性能极限	137
7.4 数值仿真	140
7.5 本章小结	144
参考文献	144
第 8 章 双向通道白噪声和编码约束网络化控制系统性能极限	145
8.1 引言	145
8.2 双向通道白噪声和编码约束多变量控制系统性能极限	145
8.2.1 问题描述	145

8.2.2	多输入多输出网络化控制系统跟踪性能极限	147
8.3	单输入单输出网络化控制系统跟踪性能极限	151
8.3.1	问题描述	151
8.3.2	双向通道噪声约束网络化控制系统跟踪性能极限	153
8.4	数值仿真	156
8.5	本章小结	156
	参考文献	157
第 9 章	基于通信约束网络化控制系统修改性能极限	158
9.1	引言	158
9.2	基于白噪声约束网络化控制系统修改性能极限	158
9.2.1	问题描述	158
9.2.2	单自由度控制器下控制系统修改跟踪性能极限	160
9.2.3	双自由度控制器下控制系统修改跟踪性能极限	165
9.3	基于控制器和滤波器协调设计修改性能极限	169
9.4	仿真分析	175
9.5	本章小结	182
	参考文献	182

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

随着通信、电子技术和计算机的快速发展与广泛应用,网络通信被引入计算机控制领域,这些复杂的系统不仅能够实现控制功能,同时还具有信息处理和决策等功能,统称为网络化控制系统^[1-3]。目前网络化控制系统已经成为国内外计算机、通信和控制等领域的研究热点。在过去十年中,网络化控制系统取得了飞速的发展及广泛的应用,已经成功渗透到经济、工业、军事及日常生活的方方面面。这种发展势将持续,并有加快的趋势。可以预言在未来的几十年中,网络化控制系统将会影响和推动计算机与控制理论及其应用的发展^[4-5]。

网络化控制系统指控制信号通过有线或无线通信网络在执行器、传感器和控制器之间传递的一种控制系统,从而达到对被控对象实行远程控制的目的,进而完成工艺的控制要求。网络化控制系统就是在经典的控制系统中引入通信网络构成的。由于通信网络的引入,增加了控制系统的复杂性。同时由于通信网络带宽、容量和服务能力的限制,使得传输的数据不可避免地存在时延、拥塞、丢包、多包传输等问题,从而导致控制系统的性能下降甚至不稳定,为此,网络化控制系统分析与设计面临着前所未有的挑战。传统控制系统通常都假设以同步和没有延时的方式运作,而在通信网络控制环境中,系统的分离元件非同步且需通过通信信道进行协调,因此时延的影响非常突出。由于必须考虑有限的带宽和通信信道的容量等因素,这给控制系统设计带来新的、根本性的约束。这一约束既是限制网络化控制系统性能的瓶颈,也是所有包含通信网络的反馈控制系统设计中的关键问题。

目前国内外许多学者主要从事网络化控制系统的建模以及稳定性分析方面的研究,取得了大量的研究成果。主要基于通信网络参数:量化、时延、数据丢包、带宽受限、比特率限制等建模以及稳定性的分析。但是在实际应用网络化控制系统的时候,不仅要考虑网络化控制系统的建模及稳定性分析问题,还要考虑网络化控制系统性能如何。目前华南理工大学学者主要通过状态空间方法来研究网络化控制系统最优跟踪性能问题,但是通过频域方法来研究网络化控制系统最优性能问题的研究人员却很少。本书主要采用频域方法来研究通信受限系统的性能问题。在实际网络化控制系统通信中,传输的信号通常是用其频域特性来描述的,采用频域方法研究得到的结果反映了被控对象内部结构特性,例如被控对象的非最小相位零点和不

稳定极点等。因此通过频域方法来分析网络化控制系统的最优性能具有很大的优势,同时研究结果能够更好地反映网络化控制系统性能与控制系统的固有特性和通信网络参数之间的内在联系,这将为网络化控制系统的设计提供重要理论指导。

1.2 控制系统的性能极限

经典控制理论主要用来解决控制系统中控制器的设计与优化问题。经典控制理论研究的对象主要是线性系统。所谓线性系统就是组成系统的各环节或元件的状态或特性可以用线性微分方程描述的系统。控制系统的数学模型就是描述控制系统的输入量、输出量和内部量之间关系的数学表达式,它是控制系统分析和设计的基础。研究经典控制系统主要采用频域分析法。控制系统设计要综合考虑性能和物理限制,可以看作是对高性能目标的追求和满足硬件限制需要的一种设计权衡。在反馈控制系统中这种限制会由于许多不同来源的限制而增加,特别是控制系统的内在特性。这些限制体现在很多方面,例如结构(空间)限制、零点和极点的限制、信道耦合产生的限制、物理限制及计算的限制等。

在控制系统分析设计过程中重要的一步就是分析各种制约因素是怎样限制控制系统性能指标的,并且通过怎样的权衡来实现设计目标。控制系统的性能分析主要从以下几个方面来考虑:第一不管控制系统的控制器如何设计,可以揭示最佳性能实现的内在极限,这不仅能够提供最优性能的估计,而且还可以作为设计控制器的基本原则;第二揭示了状态内在的性质是如何限制和破坏控制系统性能指标的。

反馈控制系统的性能极限在古典和现代控制理论中一直是一个值得研究的课题。所谓控制系统性能的极限是指由被控系统结构上的固有特征所决定的控制系统所能达到的最佳性能值。简单地说,就是不管采用什么样的控制器,系统的性能都不可能超过由其结构本质特征决定的性能极限值,从而为控制系统的实际设计提供理论指导。著名的学者 Bode 的初始工作对该领域的研究产生了深远的影响,并且启发了学术界对不同的问题、不同系统和不同的设计方法的新研究。

性能极限典型的应用就是参考信号跟踪问题和调节问题。跟踪问题和调节问题一直是控制界的两大经典主题,即使到现在也仍然有许多工作有待进一步开展。控制系统跟踪性能极限问题,实质上是研究系统在控制器的作用下,系统输出跟踪系统输入精度的极限问题,如图 1.1 所示。在图 1.1 中, r 为参考输入信号, K 为控制器, G 为被控对象, y 为系统输出, e 为系统输出 y 与参考输入 r 的差值。定义开环传递函数(矩阵) $L=GK$, 灵敏度函数(矩阵) $S=(I+L)^{-1}$, 补灵敏度函数(矩阵) $T=I-S$ 。所研究的问题是设计控制器 K 使得系统输出 y 尽可能地跟踪系统的输入 r 。连续控制系统模型性能指标是对误差求积分。即性能指标为

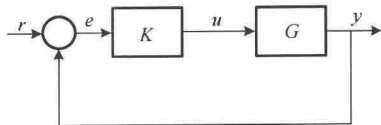


图 1.1 单自由度跟踪问题

$$J = \int_0^{\infty} \|e(t)\|^2 dt = \int_0^{\infty} \|y(t) - r(t)\|^2 dt = \|e\|_2^2$$

离散控制系统模型性能指标是对误差求和，即控制系统性能指标为

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \|e(k)\|^2 = \sum_{k=0}^{\infty} \|y(k) - r(k)\|^2$$

控制系统性能极限 $J^* = \inf_{K \in \mathcal{K}} J$ ，其中 $\mathcal{K}$ 是所有使系统稳定的控制器组成的集合；

另一种典型控制跟踪系统结构如图 1.2 所示。所研究的问题是设计控制器 $[K_1 \ K_2]$ 使得系统输出 y 尽可能地跟踪系统输入 r ，其他同上。

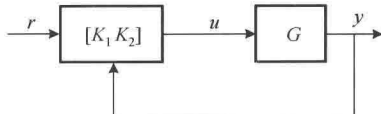


图 1.2 双自由度结构的控制系统

控制系统调节性能极限性问题，实质上是研究系统在控制器的作用下，系统输出对扰动的响应极限问题，如图 1.3 所示。在图 1.3 中， K 为控制器， G 为被控对象， y 为系统输出， d 为扰动输入，所研究的问题是设计控制器 K 使得系统输出 y 尽可能的小，即受扰动的影响尽可能的小。性能指标可以选取 $J = \|y\|_2^2$ ，控制系统调节性能极限 $J^* = \inf_{K \in \mathcal{K}} J$ ，其中 $\mathcal{K}$ 是所有使系统稳定的控制器组成的集合。目前国内外学者关于控制系统性能极限研究已经取得一些成果。Francis^[6]得出了如下结论：一个单输入单输出线性时不变控制系统的跟踪性能极限为

$$J^* = f(z_i, p_i, \tau)$$

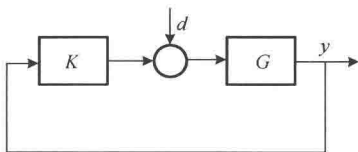


图 1.3 单自由度调节问题

其中 p_i 、 z_i 和 τ 分别表示给定对象的不稳定极点、非最小相位零点以及给定对象的时延。研究表明控制系统的跟踪性能极限仅仅由给定对象的固有特性（不稳定极点、非最小相位零点和内部时延）决定，与所选的补偿器无关；Su 等^[7]将上述问

题推广到线性时不变多输入多输出离散控制系统,并且考虑的跟踪信号是正弦信号,控制系统的跟踪性能极限为

$$J^* = \sum_{i=1}^m (1 - |q_i|^2) \left| \sum_{l=-n}^n \frac{\langle \eta_{-\omega_l}, v_l \rangle}{1 - q_l e^{j\omega_l}} \right|^2$$

研究结果表明多输入多输出控制系统跟踪性能极限仅仅由对象的非最小相位零点、零点方向和参考输入频率决定;Chen 等^[8]研究了多输入多输出线性时不变连续控制系统跟踪阶跃信号性能极限问题,控制系统的跟踪性能极限为

$$J^* = \sum_{i=1}^k \frac{2 \operatorname{Re}(z_i)}{|z_i|^2} \cos^2 \angle(\eta_i, v) + v^H H v$$

其中

$$H = \sum_{i,j \in I} \frac{4 \operatorname{Re}(p_i) \operatorname{Re}(p_j)}{(\bar{p}_i + p_j) p_i \bar{p}_j} b_i b_j (I - L^{-1}(p_i))^H (I - L^{-1}(p_j)), \quad b_i = \prod_{\substack{j \in I \\ j \neq i}} \frac{\bar{p}_j}{p_j} \frac{p_j - p_i}{\bar{p}_j + p_i}$$

这里 z_i 是给定对象的非最小相位零点, p_i 是给定对象的不稳定极点, η_i 为零点方向向量, v 为输入信号的方向向量。研究结果显示多输入多输出控制系统跟踪性能极限不仅与给定对象的非最小相位零点和不稳定极点有关,而且还与他们的方向以及输入信号的方向也有关;Peters 等^[9]考虑了多输入多输出线性时不变离散控制系统性能极限问题,研究成果指出控制系统的性能极限由被控对象的非最小相位零点和不稳定极点以及他们的方向决定;王后能^[10]针对线性时不变连续控制系统和离散控制系统分别研究控制输入能量极限问题,并进一步研究多输入多输出控制系统,采用矩阵互质分解方法来研究,得到控制系统输入能量的极限值,并且指出极限值仅仅由被控对象的固有特性决定,即由非最小相位零点、不稳定极点以及它们的方向决定。

以上研究结果显示,不管采用何种补偿器,控制系统的性能都无法超越由跟踪的信号特征和给定对象的固有特性决定的值,这个值就是控制系统性能极限。在设计控制系统控制器时,控制系统性能极限值可以作为理论指导,如果选取的补偿器能够使得控制系统的性能最接近性能极限值,那么所选取的补偿器就是最好的。因此研究控制系统性能极限具有十分重要的理论意义。

1.3 网络化控制系统的特点及基本问题

1.3.1 网络化控制系统的特点

网络化控制系统(Networked Control Systems, NCS)通常的定义是指通过一个实时网络构成闭环的控制系统,具体而言是指在某个区域内一些现场检测、控制及

操作设备和通信线路的集合,用以提供设备之间的数据传输,使该区域内不同地点的用户实现资源共享和协调操作。网络化控制系统是通信网络技术、控制技术和计算机技术等共同发展的结晶。随着计算机技术和现代控制理论的飞速发展,网络化控制系统已经向结构网络化、节点智能化、控制现场化、功能分散化、系统开放化以及产品集成化的成熟目标迈进。在该系统中,控制器通过通信网络与执行器、传感器进行信息的交换,可以方便地实现远程控制。典型的网络化控制系统的结构如图 1.4 所示。网络化控制系统是未来通信和控制技术发展的必然趋势,其显著特点如下^[1]。

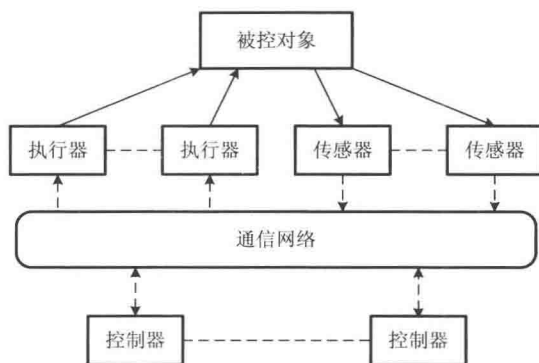


图 1.4 典型的网络化控制系统结构图

1) 控制系统的网络化

控制系统的网络化是网络化控制系统的根本特点,正是由于控制网络的引入,将原来分散在不同地点的现场设备连接成网络,才打破了自动化系统原有的信息孤岛的僵局,为工业数据的集中管理与远程传送,为控制系统和其他信息系统的连接与沟通创造了条件。

2) 信息传输的数字化

数字化与网络化相辅相成,如果网络化是从系统角度描述网络化控制系统的特点,那么数字化则是从信息的角度描述网络化控制系统。数字信号的抗干扰能力强,传输精度高,传输的信息更加丰富,同时数字化进程也大大减少了控制系统布线的复杂性。

3) 控制结构的层次化

控制系统的分层结构是引入控制网络后的另一个主要特点。在网络化控制系统中,对现场层的回路控制和顺序控制、对系统实时监控、参数调试等任务分别由处在不同层次的不同计算机完成(比如在分布式控制系统 DCS 中,现场控制层的现场控制站负责底层的回路控制和顺序控制,过程管理层的操作员站负责对系统的趋势

显示和实时监视,工程师站负责完成回路的组态、调试、下载等),每台计算机各司其职,控制层次与控制任务得到了细分。

4) 底层控制的分散化与信息管理的集中化

这一特点是控制结构层次化的延伸。分层结构确定了网络化控制系统金字塔形的整体框架,在底层网络化控制系统利用现场控制设备实现了分布式控制,增强了控制系统的可靠性,在高层实现了对底层数据的集中监视、管理,为上层的协调优化,甚至对宏观决策提供必要的信息支持。

5) 硬件和软件模块化

各种网络化控制系统的软硬件目前都采用了模块化结构,硬件的模块化使得系统具有良好的灵活性和可扩展性,使得系统的成本更低、体积更小、可靠性更高,软件的模块化使得系统的组态方便、控制灵活、调试效率高、操作简单。

6) 控制系统的智能化

该智能化包含两个方面的内容,即现场设备的智能化和控制算法与优化算法的智能化。一方面,在底层由于微处理器的引入,现场设备不仅能够完成传感测量、回路控制等基本功能,还可以进行补偿计算、故障诊断等;另一方面,在高层 NCS 提供了强大的计算机硬件平台,为先进的控制算法、人工智能方法、专家系统的使用提供了条件,一些先进的控制算法软件包(如模型预测控制、模型控制等)已经被开发并广泛使用,人工智能、专家系统也开始用于操作指导、优化计算、计划调度、科学管理等各个方面。

7) 通信协议的渐近标准化

通信协议的标准化意味着系统具有良好的开放性、互操作性。在互联网中, TCP/IP 已经成为标准协议,而在控制网络中,传统的 DCS 系统各成体系,集中式控制系统 FCS 尽管已经达成了国际总线标准,但总线种类仍有 10 余种,甚至于工业以太网也出现了多种不同的国际标准协议,因此通信协议标准的统一必将是一个漫长的过程。

1.3.2 网络化控制系统基本问题

网络化控制系统是融合通信和控制两大理论的一类特殊系统,相比单一的控制系统而言,网络化控制系统具有许多优点。网络化控制系统中信息的传输主要是通过网络进行的,而网络的带宽总是有限的,因此网络自身的特点不可避免地造成网络化控制系统的复杂性,主要表现在以下几个方面^[12]。

(1) 在网络化控制系统中,通信设备共享网络并采用分时复用的方式来传输数据,由于网络带宽的限制,使得网络化系统中不可避免地存在着资源竞争和网络拥塞等现象,从而导致数据传输的延迟,即通信网络诱导时延。

(2) 在网络化控制系统中, 存在传输设备故障、网络拥塞、连接突然中断等客观因素, 这些因素往往都会导致数据包丢失, 因此网络化控制系统中还存在着数据丢包现象。

(3) 在网络控制化系统中, 由于路由设备会根据实际网络的具体情况来选择合适的网络传输路径进行数据传输, 因此数据在传输过程中存在着不同的路由选择, 从而使得数据包的时序发生错乱。

(4) 在网络化控制系统中, 控制系统的性能不仅依赖于所设计的控制算法, 而且依赖于对通信网络资源的调度。调度问题就是由网络节点来决定发送数据包的次序和时间。如何利用有限的网络资源, 优先发送比较重要的数据, 尽量避免网络拥塞, 减小网络中的冲突, 从而缩小网络诱导时延, 减少数据包在传输过程中丢包的概率。

(5) 数据在网络中进行传输, 首先要对信息进行编码和解码, 由于网络中存在着大量的不确定因素, 导致传输的数据不可避免地发生误码现象, 使得发送的信息与接收到的信息之间存在着一定的误差。

另外, 由于网络带宽的限制, 网络化控制系统中还存在着单包传输和多包传输等问题。正是由于这些问题的存在, 使得网络化控制系统的分析与优化设计变得十分困难。而且网络化控制系统的性能不仅仅依靠控制算法, 还建立在好的网络运行质量上, 因此考虑网络性能应该从控制与通信的角度对网络化控制系统进行合理地分析和协同设计。

1.4 国内外研究概况

在网络化控制系统带来诸多优点的同时, 也给人们带来了许多新的挑战, 由于通信网络的原因在控制回路中引入了时延、丢包、数据包时序错乱、量化误差等问题, 将导致数据在传输时发生阻塞以致丢失, 降低了信息传输的实时性。通信信道中存在的这些不利影响因素, 将会降低网络化控制系统的鲁棒性^[13-16], 更严重的将会导致系统不稳定^[17-19]。因此, 针对网络化控制系统中的这些新问题, 必须相应地采用新方法、新理论来分析和研究网络化控制系统, 即研究网络化控制系统的稳定性问题和性能问题。控制系统的稳定性和性能问题, 一直是控制领域关注的两大主题。网络化控制系统的研究同样也是从稳定性和性能分析两个方面展开。

目前国内外许多学者针对网络化控制系统的稳定性问题进行相关研究, 并取得了丰富的研究成果。主要研究包括基于信道参数(量化^[20-22]、时延^[23-26]、数据丢包^[27-28]、带宽受限^[29]、比特率限制^[30])建模以及稳定性的分析。关治洪等^[31]基于脉冲混杂系统理论和方法研究了网络化控制系统在丢包和时滞情形下的建模分析与设计问题; 郭戈等^[32]采用模型的控制方法, 考虑通信信道中的量化约束, 研究基于模

型的量化状态反馈网络化控制系统的稳定性问题,并且得到网络化控制系统稳定的充要条件;杨光红等^[33]基于量化反馈控制研究了连续时间网络化控制系统稳定性问题,并且通过 Lyapunov 稳定性理论得到了网络化控制系统稳定的充分条件;Han 等^[34]提出了基于时滞相关的分析方法,并给出了控制设计和滤波器设计的系列结果;费敏锐等^[35]在网络先进控制理论与系统实现、分散、现场控制系统及其相关技术和应用方面得到了一些结果;田玉平等^[36]研究带有随机数据包丢失和网络诱导时延的网络化控制系统的随机稳定性问题;彭晨等^[37]通过在执行器端引入逻辑 ZOH 实现最新控制输入信号选择功能的网络化控制系统模型,并得到一种改进的包含非理想网络特征的网络化控制系统分析与综合方法;褚红燕^[38]等基于量化约束研究网络化控制系统的稳定性问题,并基于 T-S 模型方法提出包含丢包、量化信息和时延的新的网络化控制系统模型,采用 Lyapunov 稳定性方法得到网络化控制系统的稳定条件;俞立等^[39]研究了反馈通道和前向通道均存在随机长时延的一类网络化控制系统的性能控制问题;陈宁^[40]等针对网络化控制系统同时具有控制输入和状态的两量化器的不确定性研究其稳定性问题,并且提出量化器参数和反馈控制器的设计方法,进一步得到网络化控制系统稳定的条件;柴利等^[41]通过在传感器节点上先假设一个阈值,通过阈值将测量数据量化成多个比特,进而得到了无线传感器网络的多比特分布式在线优化的计算方法;杨春曦^[42]针对网络化控制系统的时延特点建立时变时滞网络化控制系统模型,并采用 Lyapunov 稳定性理论、线性矩阵不等式技术和时滞系统的相关理论得到了网络化控制系统稳定条件,同时提出一种新的随机切换控制器用来镇定离散时间马尔可夫跳变线性系统;苏宏业^[43]基于随机通信时延研究了一类无线网络化控制系统的稳定性问题,并采用参数模式相关的状态反馈控制器来实现;陈积明^[44]研究了无线网络控制系统的控制性能在很大程度上取决于传感器到控制器和控制器到执行器两者间的数据传递质量;关新平^[45]研究具有随机丢包的 Lipschitz 非线性无线网络化控制系统的稳定性问题;孙增圻^[46]通过构造依赖于参数的 Lyapunov 函数方法,给出了基于时延、丢包和数据包时序错乱的无线网络控制系统的稳定条件;王涛^[47]研究了无线网络化控制系统的迭代学习控制的收敛速度问题;Xu^[48]针对有通信网络诱导时延和数据包丢失的网络化控制系统的稳定性问题进行了深入研究;杨春曦^[49]考虑了网络化控制系统在网络诱导时延情况下的建模问题,并进一步研究了系统稳定性条件和控制器设计问题;严怀成^[50]考虑变时滞和多数据包丢失的情况下研究网络化控制系统的 H_∞ 控制问题,并得到系统满足均方意义下指数稳定充分条件;Donkers^[51]考虑时变传输间隔、时变传输时延和数据包丢失的影响来研究网络化系统的稳定性,并得出系统稳定的条件;杨园华^[52]考虑了网络控制系统在随机测量时滞情况下的最优估计问题。其他主要工作见文献[53]~[56]。

充分考虑网络运行性能、控制需求等多重因素的影响,从控制与通信的角度对网络化控制系统合理地分析和设计,是网络化控制系统实用化所必需的理论基础和