

本书的出版和所研课题得到如下项目资助：  
国家自然科学基金 (61104093, 61074029)  
中国博士后科学基金资助项目 (20100471488)

# 基于网络QoS的 控制系统分析与综合

---

李金娜 张庆灵 袁德成 著



科学出版社

本书的出版和所研课题得到如下项目资助：  
国家自然科学基金(61104093,61074029)  
中国博士后科学基金资助项目(20100471488)

# 基于网络 QoS 的 控制系统分析与综合

李金娜 张庆灵 袁德成 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统地介绍作者和国内外学者在基于网络 QoS 的控制系统分析与综合方面的研究成果。全书共 7 章,内容涉及网络控制系统的国内外研究现状,控制理论、图论和区间系统的相关理论知识,基于网络 QoS 的控制系统能控性与能观性分析,基于网络 QoS 的控制系统建模、分析与控制,以及基于网络 QoS 的控制系统分析与控制的图论方法。

本书主要读者对象为高等院校和科研院所从事网络控制系统研究的教师、科研人员、博士和硕士研究生等。本书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、系统工程、机械工程和自动化、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、硕士和博士研究生的专业参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于网络 QoS 的控制系统分析与综合/李金娜,张庆灵,袁德成著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-033796-2

I. ①基… II. ①李…②张…③袁… 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(2012)第 040116 号

责任编辑:余 丁 张 宇 / 责任校对:朱光兰

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕 者

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

\*

2012 年 4 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 4 月第一次印刷 印张: 8

字数: 151 000

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, NCSs)是指控制节点(传感器、控制器以及执行器)通过网络集成的一种闭环反馈控制系统。与传统的控制系统相比,这种网络化的控制系统具有信息资源共享、可远程操作、省时、易于维护等优点。在现代工业和商业各个领域,已经广泛应用实时网络来交换信息和控制信号,网络控制系统发挥着重要作用,已经成为控制界研究的热点。然而,由于网络的介入,控制系统中不可避免地存在网络服务质量(quality of service, QoS)问题,包括传输时延、数据包丢失、数据包错序等。这些问题的存在降低了系统的性能,甚至导致系统不稳定,使得控制系统的分析与综合变得更加复杂,给控制系统的研究带来了新的挑战。

近年来,基于 QoS 的控制系统研究已经取得了一些成果。但是,主要集中于研究网络诱导时延和数据包丢失问题。对于输入受限、丢包补偿、具有错序的网络控制系统分析与控制以及网络控制系统的能控性与能观性问题仍有待于进一步研究,尤其是关于采用图论方法研究网络控制系统的稳定性及控制器设计还鲜见报道。

本书在充分考虑网络通信带来的不利因素的基础上,针对上述问题,利用李雅普诺夫稳定性定理、随机理论以及图论等方法,研究了基于网络 QoS 的控制系统分析与综合问题。本书主要是作者基于东北大学攻读博士学位期间博士课题的研究成果,加以充实和整理完成的。全书共 7 章。

第 1 章:绪论。主要介绍网络控制系统的国内外研究现状以及网络控制系统的主要研究方向。

第 2 章:预备知识。主要介绍控制理论基本概念、图论基本概念、区间系统基本概念、常用符号和一些重要引理。

第 3 章:基于网络 QoS 的控制系统能控性与能观性分析。针对具有有界时延和有界数据包丢失的网络控制系统,建立面向网络的离散时滞不确定系统模型。在此基础上,获得离散时滞不确定网络控制系统能控性、能观性指数,推导出网络控制系统能控、均值能控的充分必要条件,讨论离散网络控制系统与原初始系统能控性和能观性的关系,得出离散时滞不确定网络控制系统能控性与网络诱导时延相关、能观性与网络诱导时延无关的结论。

第 4 章:具有时延和丢包的网络控制系统建模与控制。考虑到网络通信中不可避免地存在网络诱导时延、数据包丢失和数据包错序现象,以及系统具有噪声干扰这些问题,建立具有事件率约束的异步动态切换系统。所建模型更贴近实际

系统,具有普适性。对控制器施加饱和和非线性约束,保证控制输入有界,进一步研究该系统的  $H_\infty$  控制问题。

第 5 章:具有丢包补偿的网络控制系统  $H_\infty$  控制。给出具有随机时延和数据包丢失的网络控制系统模型,得到渐近稳定的充分条件。在此基础上,建立具有任意有界时延和丢包补偿的切换系统,同时给出稳定性判据,进一步,获得  $H_\infty$  干扰衰减度  $\gamma$  存在的充分条件及控制器设计方案;分析网络诱导时延的 Markov 特征,给出具有丢包补偿和 Markov 跳变参数的不确定网络控制系统鲁棒  $H_\infty$  控制方案。

第 6 章:具有数据包错序的网络控制系统  $H_\infty$  控制。提出能充分描述数据包错序现象并能有效消除错序对系统性能影响的新的网络控制系统模型。基于矩阵理论,模型转化为具有多步时滞的参数不确定离散系统,得到系统稳定性判据,获得保证系统稳定的最大允许时延界(maximum allowable delay bound, MADB);进一步,选用改进的李雅普诺夫(Lyapunov)函数,给出新的  $H_\infty$  控制判据,应用线性矩阵不等式(linear matrix inequalities, LMIs)技术,获得优化  $H_\infty$  控制器设计方案。

第 7 章:基于网络 QoS 的控制系统稳定性分析与控制:图论理论。基于图论理论,给出非线性网络控制系统和区间网络控制系统稳定的充分条件,得到控制器设计方案,获得保证非线性网络控制系统稳定的 MADB。对于区间网络控制系统,在同一时延和丢包情况下,得到多个控制器参数,实现切换控制系统,从而有效提高系统的性能指标。

由衷地感谢中国科学院沈阳自动化研究所梁炜研究员、徐伟杰师弟,沈阳师范大学孙欣副教授,沈阳工业大学李媛副教授以及沈阳体育学院姜翀副教授给予我学术上的支持和帮助! 真诚感谢对于出版本书给予关心、资助和支持的各位朋友!

近年来网络控制系统的研究备受国内外学者的关注,新理论、新技术和新的科研成果不断涌现。由于作者水平有限,在基于新的理论与方法研究解决问题的过程中,不恰当乃至不准确的方法或结论在所难免,敬请专家和读者批评指正,谢谢!

作 者

# 目 录

## 前言

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                      | 1  |
| 1.1 引言 .....                        | 1  |
| 1.2 网络控制系统的国内外研究现状 .....            | 3  |
| 1.2.1 基于网络 QoS 的网络控制系统研究现状 .....    | 3  |
| 1.2.2 输入受限 .....                    | 7  |
| 1.2.3 控制方法 .....                    | 7  |
| 1.2.4 能控性与能观性 .....                 | 8  |
| 1.2.5 多输入多输出 .....                  | 8  |
| 1.2.6 有限传输 .....                    | 9  |
| 1.2.7 变采样 .....                     | 10 |
| 1.2.8 量化问题 .....                    | 10 |
| 1.3 网络控制系统研究的重要问题 .....             | 11 |
| 1.3.1 具有时延和数据包丢失的 NCSs 的分析与控制 ..... | 11 |
| 1.3.2 具有时延和数据包丢失补偿的 NCSs 优化控制 ..... | 11 |
| 1.3.3 具有错序的 NCSs 优化控制 .....         | 11 |
| 1.3.4 NCSs 的能控性与能观性 .....           | 12 |
| 1.3.5 输入受限的 NCSs 控制与优化 .....        | 12 |
| 1.3.6 非线性 NCSs 的稳定性分析与控制 .....      | 12 |
| 1.3.7 多输入多输出 NCSs .....             | 13 |
| 1.3.8 NCSs 的有限传输 .....              | 13 |
| 1.3.9 NCSs 的仿真 .....                | 13 |
| 1.4 本书主要研究成果 .....                  | 14 |
| 参考文献 .....                          | 16 |
| 第 2 章 预备知识 .....                    | 26 |
| 2.1 控制理论基本概念 .....                  | 26 |
| 2.2 图论基本概念及符号说明 .....               | 29 |
| 2.3 区间系统基本概念及符号说明 .....             | 29 |
| 2.4 引理 .....                        | 30 |
| 2.5 本章小结 .....                      | 31 |

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| 参考文献 .....                                                 | 31        |
| <b>第 3 章 基于网络 QoS 的控制系统能控性与能观性分析 .....</b>                 | <b>32</b> |
| 3.1 问题描述 .....                                             | 32        |
| 3.2 基于网络 QoS 的控制系统能控性分析 .....                              | 33        |
| 3.3 基于网络 QoS 的控制系统能观性分析 .....                              | 37        |
| 3.4 算例仿真 .....                                             | 38        |
| 3.5 本章小结 .....                                             | 38        |
| 参考文献 .....                                                 | 38        |
| <b>第 4 章 具有时延和丢包的网络控制系统建模与控制 .....</b>                     | <b>40</b> |
| 4.1 具有时延和数据包丢失的 NCSs 建模 .....                              | 41        |
| 4.1.1 问题描述 .....                                           | 41        |
| 4.1.2 系统建模 .....                                           | 42        |
| 4.1.3 算例仿真 .....                                           | 45        |
| 4.2 具有饱和和非线性约束的 NCSs 鲁棒 $H_\infty$ 控制 .....                | 47        |
| 4.2.1 问题描述 .....                                           | 47        |
| 4.2.2 稳定性分析与控制器设计 .....                                    | 48        |
| 4.2.3 算例仿真 .....                                           | 50        |
| 4.3 本章小结 .....                                             | 52        |
| 参考文献 .....                                                 | 52        |
| <b>第 5 章 具有丢包补偿的网络控制系统 <math>H_\infty</math> 控制 .....</b>  | <b>54</b> |
| 5.1 具有任意时延和丢包补偿的 NCSs $H_\infty$ 控制 .....                  | 54        |
| 5.1.1 问题描述 .....                                           | 55        |
| 5.1.2 $H_\infty$ 控制 .....                                  | 58        |
| 5.1.3 算例仿真 .....                                           | 61        |
| 5.2 具有丢包补偿和 Markov 跳变参数的 NCSs $H_\infty$ 控制 .....          | 63        |
| 5.2.1 问题描述 .....                                           | 64        |
| 5.2.2 $H_\infty$ 控制 .....                                  | 66        |
| 5.2.3 算例仿真 .....                                           | 68        |
| 5.3 本章小结 .....                                             | 70        |
| 参考文献 .....                                                 | 71        |
| <b>第 6 章 具有数据包错序的网络控制系统 <math>H_\infty</math> 控制 .....</b> | <b>72</b> |
| 6.1 具有错序和长时延的 NCSs 建模与镇定 .....                             | 73        |
| 6.1.1 问题描述 .....                                           | 74        |
| 6.1.2 稳定性分析与控制器设计 .....                                    | 78        |
| 6.1.3 算例仿真 .....                                           | 82        |

---

|                                                |            |
|------------------------------------------------|------------|
| 6.2 具有错序的 NCSs $H_\infty$ 控制 .....             | 86         |
| 6.2.1 问题描述 .....                               | 86         |
| 6.2.2 $H_\infty$ 控制器设计 .....                   | 87         |
| 6.2.3 算例仿真 .....                               | 94         |
| 6.3 本章小结 .....                                 | 98         |
| 参考文献 .....                                     | 98         |
| <b>第 7 章 基于网络 QoS 的控制系统稳定性分析与控制:图论理论 .....</b> | <b>101</b> |
| 7.1 基于网络 QoS 的非线性网络控制系统的图理论 .....              | 101        |
| 7.1.1 问题描述 .....                               | 102        |
| 7.1.2 稳定性判据及控制器设计 .....                        | 103        |
| 7.1.3 算例仿真 .....                               | 107        |
| 7.2 基于网络 QoS 的控制系统区间稳定的图理论 .....               | 109        |
| 7.2.1 问题描述 .....                               | 109        |
| 7.2.2 稳定性判据及控制器设计 .....                        | 110        |
| 7.2.3 算例仿真 .....                               | 112        |
| 7.3 基于网络 QoS 的一类网络控制系统区间稳定的图理论 .....           | 114        |
| 7.3.1 问题描述 .....                               | 114        |
| 7.3.2 稳定性判据及控制器设计 .....                        | 115        |
| 7.3.3 算例仿真 .....                               | 116        |
| 7.4 本章小结 .....                                 | 118        |
| 参考文献 .....                                     | 118        |
| <b>附录 符号描述 .....</b>                           | <b>120</b> |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

网络控制系统(networked control systems, NCSs)是通过一系列的通信信道构成一个或多个闭环实时反馈控制系统,同时具备信号处理、优化决策和控制操作的功能<sup>[1, 2]</sup>。进入 21 世纪以来,随着控制、计算机和通信技术的飞速发展,特别是网络中数据传输能力和负载能力的飞速提高及网络共享资源的不断丰富,网络控制系统迎合了工业、医疗和交通等领域实现低成本、节能、高效和智能化发展的迫切需要,被迅速应用到上述领域<sup>[1]</sup>。鉴于网络 QoS 不可避免会对控制系统性能造成影响,为保证可靠、实时的网络通信,降低能耗,获得较高的控制性能指标,有必要采用先进的控制理论方法,研究基于网络 QoS 的控制系统分析与综合。

早在 Walsh<sup>[3]</sup>的论著中就已经出现了 NCSs 的图示,随后 Murray 和 Astrom 等<sup>[4]</sup>提出了 NCSs 的概念。我国 NCSs 的研究开始于 21 世纪初现场总线控制系统的应用<sup>[5]</sup>。网络控制系统以其良好的性能优点,被迅速应用到复杂的工业控制域,如直流电(direct current, DC)控制系统、远程医疗、远程教学、机器人遥控操作、装备制造、智能交通系统和虚拟制造等领域<sup>[6]</sup>。近年来, *Proceedings of the IEEE*<sup>[7]</sup>、*IEEE Transactions on Automatic Control*<sup>[8]</sup>和《信息与控制》<sup>[9]</sup>等国内外各大杂志相继出版了网络控制系统专刊。《信息与控制》专刊系统、全面地刊登了国内网络控制系统研究的新成果,内容涵盖模糊卡尔曼滤波、网络调度、PID 控制、广义预测控制、多包传输和性能优化等。科学出版社于 2007 年出版了普通高等教育“十一五”国家级规划教材《网络控制系统》<sup>[5]</sup>以及《网络控制系统的分析与综合》<sup>[1]</sup>专著。东北大学张庆灵教授编著的《网络控制系统》一书,系统地介绍了 NCSs 的发展历程、系统组成、结构特点、稳定性分析、控制器设计以及性能优化等问题。国内外重要的学术杂志(如 *Automatica*、*IEEE Transaction on Automatic Control*、*International Journal of Control*、自动化学报、控制理论与应用等)和会议(如 The International Federation of Automatic Control、IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation 等)报告了大量网络控制方面的研究成果。Tipsuwan 和 Chow<sup>[10]</sup>于 2003 年总结了 NCSs 的控制方法。Yang<sup>[11]</sup>于 2006 年对文献<sup>[10]</sup>给予了更新和补充,给出网络控制系统的一般框架,同时评论了 NCSs 对

大系统以及其他领域的影响。文献[6]的内容是关于网络诱导时延、数据包丢失、采样和系统构造等问题,就 NCSs 的估计、分析、控制综合等方面,总结最新研究成果。总之,网络控制系统的研究已经成为国内外控制界研究的热点。

与正常系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u, t) \\ y = g(x, u, t) \end{cases} \quad (1.1)$$

相比, NCSs 中增加了网络诱导时延、数据包丢失、数据包错序、抖动和网络拥塞等不确定因素,这使得系统的分析与控制较正常系统复杂,由此增加了研究的困难。关于正常系统的一些结果已经不适用于 NCSs,需要重新研究 NCSs 的分析与控制,保证并提高网络 QoS,优化系统性能。在研究 NCSs 的初始阶段,一般分开考虑网络诱导时延和数据包丢失。往往假定网络诱导时延变化率很小或为常时延<sup>[12,13]</sup>。然而, NCSs 的实际应用中网络诱导时延常常是时变的、不确定的<sup>[2]</sup>,很多学者开始研究具有时变或不确定网络诱导时延的 NCSs 的分析与控制。由假定网络诱导时延为时变短时延(网络诱导时延小于一个采样周期)<sup>[2,14~17]</sup>发展到任意时延(网络诱导时延大于等于或小于一个采样周期)<sup>[18~20]</sup>。Zhang<sup>[2]</sup>开始用开关表示数据包丢失与否,将具有数据包丢失的网络控制系统建模为异步动态系统(asynchronous dynamic systems, ADS),给出系统指数稳定的条件,讨论系统的衰减率。随后,掀起了关于同时考虑网络诱导时延和数据包丢失、以及对时延和数据包丢失补偿的网络控制系统分析与控制的研究的高潮<sup>[21~24]</sup>。这些理论成果为后继的研究奠定了理论基础,使网络控制系统理论初现轮廓。网络控制系统的研究日益细化,很多文献假定网络诱导时延、数据包丢失服从 Markov 链或某种概率分布,基于随机理论设计控制器<sup>[25~30]</sup>。近年来,网络控制系统研究呈现多元化、复杂化、实际化发展趋势,更多学者开始研究网络 QoS、量化、有限传输、变采样周期等问题。

目前,关于网络控制系统的研究日益深入,研究对象包括连续系统<sup>[2,15~17]</sup>、离散系统<sup>[31~34]</sup>和混杂动态系统<sup>[2,18~22,35]</sup>等,但对于非线性系统、区间系统的研究还鲜见报道;研究内容包括系统建模<sup>[36~39]</sup>、稳定性分析<sup>[40~42]</sup>、保性能控制<sup>[43~45]</sup>、 $H_\infty$ 控制<sup>[19,20,27]</sup>和故障诊断<sup>[23,46~49]</sup>等,但具有错序的网络控制系统建模以及性能优化的研究还不成熟;研究方法包括确定性控制、随机控制、智能控制和切换系统控制等,上述方法一般应用 Lyapunov 函数,得到保证系统稳定或具有一定性能指标的线性矩阵不等式(linear matrix inequalities, LMIs)条件,而应用图论方法设计 NCSs 控制器的文献还未见报道。NCSs 的研究一般包括两类,一类是基于网络环境的系统分析与控制;另一类是系统对网络的控制<sup>[10]</sup>。本书研究的是前者。由于网络作为控制系统的传输媒介,一些非理想因素,如网络诱导时延、数据包丢失、数据包错序等现象不可避免,这使得控制系统的分析、设计变得非常复杂。那么

在网络存在非理想因素的环境下,网络控制系统的研究重点为:一是在现存网络环境下,设计合理的控制器保持系统稳定并且具有较好的性能指标;二是设计补偿控制器,降低网络时延、丢包、错序等因素对系统性能的影响,不仅镇定系统而且使系统具有较好的性能指标。本书正是在上述思想的指导下,研究 NCSs 的控制与优化的,因此具有一定的理论和实际意义。

## 1.2 网络控制系统的国内外研究现状

目前,国内外学者对具有网络诱导时延、数据包丢失、数据包丢失补偿、数据包错序、控制输入受限的网络控制系统,以及非线性网络控制系统的研究已取得了一系列的成果。下面具体介绍。

### 1.2.1 基于网络 QoS 的网络控制系统研究现状

#### 1. 网络诱导时延和数据包丢失

##### 1) 网络诱导时延

多种信息源共享网络资源,而网络的传输能力和通信带宽有限,信息的冲撞、重传等现象不可避免,这使得网络诱导时延和数据包丢失必然存在。如图 1.1 所示,网络诱导时延包括传感器-控制器时延  $\tau_{sc}^k$ 、控制器-执行器时延  $\tau_{ca}^k$  以及控制器执行运算产生的时延  $\tau_c^k$ 。一般情况下,  $\tau_c^k$  远小于  $\tau_{sc}^k$  和  $\tau_{ca}^k$ , 所以经常并入  $\tau_{sc}^k$  和  $\tau_{ca}^k$  中<sup>[5]</sup>。网络诱导时延与网络的传输协议相关,可能是固定的,也可能是时变的,甚至是任意的<sup>[2]</sup>;可能是短时延,也可能是长时延。针对网络中存在时延的情况,对系统进行分析与控制,一般需要对传感器、控制器以及执行器的驱动方式做假定。文献[50]、[51]考虑传感器和控制器均为时钟驱动,执行器为事件驱动;文献[52]、[53]建立了节点对象全为时钟驱动的长时延 NCSs 闭环模型;文献[54]中假定传感器为时钟驱动,控制器和执行器均为事件驱动,建立了连续+离散的 NCSs 闭环模型。文献[25]~[27]提出时间、事件驱动方式。长时延的 NCSs 中执行器最好为事件驱动,控制器最好为事件驱动,以便被控对象能够获得更多的控制信息,系统具有良好的性能指标。下面介绍几种处理网络诱导时延的方法。

##### (1) 固定时延方法

在实际控制系统中,网络诱导时延通常是时变的、不确定的。在现存的文献中,将时变时延转化为固定时延是处理网络诱导时延的一种方法<sup>[24,55~57]</sup>,即通过设置缓冲区的方法,将不确定时延转化为固定时延。该方法容易系统建模与分析,但是这种做法可能使网络诱导时延加大,从而降低 NCSs 的性能,增加结果的保守性。

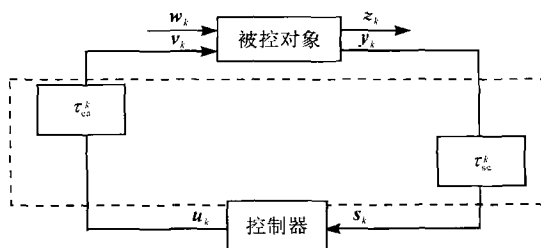


图 1.1 网络控制系统模型

### (2) 随机方法

针对时变或不确定网络诱导时延, Nilsson 等<sup>[58]</sup>采用随机控制方法, 即假定网络诱导时延服从某种概率分布, 将 NCSs 建为随机系统模型, 进行分析与控制。针对状态信息完全能观和部分能观两种情况, 文献[28]给出网络诱导时延长于一个采样周期的优化控制器设计方案。但是, 文献[28]、[58]没有讨论控制输入变化时刻的概率分布, 很难推导优化控制律。Ma 和 Fang<sup>[25]</sup>讨论了网络诱导时延的 Markov 特征, 设计优化控制器。文献[59]引入区间划分的伯努利分布序列, 基于随机理论, 研究了 NCSs 的均方稳定性。

### (3) 鲁棒方法

目前很多文献采用鲁棒方法处理网络诱导时延问题。根据矩阵理论, 文献[14]针对网络诱导时延小于一个采样周期的情况, 将 NCSs 建模成参数不确定时滞系统, 进而研究了系统的稳定性。文献[60]考虑时延的影响, 通过等效变换将时延和采样周期的不确定性转化为系统参数的不确定性, 从而将 NCSs 建模为一类具有参数不确定性的离散时滞系统, 并给出系统 D-稳定的控制器设计方法, 实现 NCSs 的控制与调度协同设计。分解网络诱导时延为固定和时变两个部分<sup>[31, 61, 62]</sup>, 或假定网络诱导时延属于某个区间<sup>[34]</sup>, 建模 NCSs 为参数不确定系统。很明显, 由于网络诱导时延受限, 文献[31]、[34]、[61]、[62]的方法存在一定的保守性。

### (4) 时滞方式

研究具有任意网络诱导时延的 NCSs, 文献[18]~[20]、[35]考虑连续系统和离散控制器, 将 NCSs 建成连续+离散系统模型, 基于先进的时滞理论研究系统的稳定性和  $H_\infty$  控制问题。

### (5) 时延切换方法

假定网络诱导时延属于某个区间, 将区间等划分, 把 NCSs 建成切换系统<sup>[63, 64]</sup>, 进而研究系统的稳定性和性能指标。但此种方法随着划分区间的增多, 计算复杂性会增大。

最大允许网络诱导时延界(MADB),即保证系统稳定的信号从传感器采样时刻至执行器将信号输出到被控对象时刻的最大时间间隔<sup>[17,65]</sup>。文献[2]、[17]、[65]给出短时延的 NCSs 的最大 MADB 计算方法;文献[27]、[54]研究了具有多步时滞的 NCSs 的 MADB 问题。

## 2) 数据包丢失

NCSs 中数据包的丢失可能有以下几种情况<sup>[5]</sup>:在网络传输过程中由于存在数据传输冲突和节点失败,导致数据包丢失;大多数网络具有重新传输的机制,但因为有时间限制,若超过限定的时间,数据包仍然会丢失;数据包在发送过程中发生错误,则被控制器节点丢弃;传感器节点竞争数据发送权时,超过了协议允许的重发次数(时间)或者采样周期,传感器节点放弃本次发送。近年来,对于 NCSs 数据包丢失的研究已有一些成果。处理 NCSs 中数据包丢失的问题,一般采用 ADS 方法和 Markov 跳变系统方法。文献[2]在考虑状态反馈以及网络仅存在于传感器和控制器之间的情况下,将有数据包丢失的 NCSs 建模为异步动态系统,研究了系统指数稳定的最大数据包丢失率和系统开环状态及闭环结构的关系,但没有考虑网络诱导时延。文献[66]考虑传感器-控制器、控制器-执行器之间均存在网络的情况,将有数据包丢失的 NCSs 建模为有事件率约束的异步动态系统,研究了由系统结构事件率约束的指数稳定性,并结合线性矩阵不等式和遗传算法,提出系统二次稳定的方案。文献[67]分析了具有数据包丢失的 NCSs 稳定性。Ishii<sup>[68]</sup>考虑传输渠道具有任意数据包丢失的情况,研究保证系统稳定的最大丢包率。文献[29]、[69]将具有数据包丢失的 NCSs 建成 Markov 跳变系统,给出系统稳定的充分条件。文献[70]考虑数据包丢失,把 NCSs 建模为两个事件的异步动态系统。然而,上述文献中,网络诱导时延和数据包丢失是分离的。在实际的 NCSs 中,网络诱导时延和数据包丢失常常是共同存在的。文献[65]、[71]同时考虑网络诱导时延和数据包丢失问题,提出新的 NCSs 模型,目的是设计控制器。

## 2. 网络诱导时延和丢包补偿

网络传输中时延和数据包的丢失对系统的性能产生重大影响,会降低系统性能指标。为解决这一问题,在现有文献中一般采用估计和预测方法。

### (1) 状态观测器估计方法

文献[72]设计了一种可以对随机时延进行补偿的状态观测器,该状态观测器可以实现对噪声的滤波处理,研究了闭环系统的稳定性。文献[73]在执行器接收端设置寄存器,以整数倍的传感器采样速率读取采样信号,并计算控制量,从而使采样信号得到最优利用,进而在一定程度上减小了网络诱导时延。文献[74]针对任意网络诱导时延,提出补偿方案,给出系统稳定的条件。文献[75]为数据包丢失提出补偿方案,根据是否丢包设计开环估计和闭环估计,并且分析了稳定性。

文献[76]通过运用被控系统的近似模型,提出对网络诱导时延和数据包丢失的联合估计和补偿方法,进而分析了这一系统的指数稳定性。然而,文献[76]假定网络诱导时延小于一个采样周期。其他参见文献[77]、[78]。

### (2) 预测器方法

文献[79]提出提前  $p$  步预测方法,允许系统有连续  $p-1$  个数据包丢失。文献[80]提出基于预测控制器和时延补偿器的控制方法,对系统进行分析与控制。随后,文献[81]提出切换预测系统,基于随机理论分析系统的稳定性。文献[82]引入基于网络的预测模型控制策略,将时延序列包封包同时传输给被控对象。文献[83]提出事件驱动方式的 NCSs 预测模型,根据系统输出设计预测方案,改进文献[82]中的方法。文献[84]给出具有任意有界时延的 NCSs 预测控制方法,进而给出稳定性判据。文献[85]采用多信道传输方式,弥补网络诱导时延和数据包丢失对系统性能的影响,并给出  $H_\infty$  控制器设计方案。

### 3. 数据包错序

数据传输错序已经是现代工业、商业网络化应用中的一个普遍现象。数据包错序对端对端的用户性能有着严重的影响,导致用户终端和网络无效资源的利用<sup>[86]</sup>。文献[87]给出基于网络辨识的自适应控制系统,针对实际工业模型仿真,表明辨识器端的错序会导致无错序情况下设计的控制器失效,控制输出不收敛。因此,有必要研究网络控制系统中的错序问题。目前,对网络传输中错序问题的研究刚刚起步。在文献[87]中,控制单元与整定单元地理上分离,控制系统的整定回路是通过网络(或总线)闭环,为解决错序问题,通过设置缓存将时延放大到最大时延以便消除错序。但是,此方法具有很大的保守性,并且未考虑传感器-控制器、控制器-执行器的时延。在文献[88]中,引入数据包的有效到达时刻和等效到达时刻的概念,通过对数据包的实际到达时刻等效化处理,建立数据包错序情况下的 NCSs 模型。然而,没有在建立模型的基础上进一步研究系统稳定性和控制器设计方案。文献[62]、[65]、[89]在传感器端设置时间戳,执行器接收端根据时间戳抛弃错序包,以便使系统获得最新数据信息。文献[65]、[89]又给出丢包的补偿方案,进一步研究了系统的  $H_\infty$  控制问题。但是,文献[62]、[65]、[89]并未对网络中存在数据包错序现象给予明确描述,并且文献[62]假定网络诱导时延由固定和时变两个部分组成,每个采样周期最多两个控制输入作用被控对象。显然,此方法存在一定的保守性。文献[54]、[90]综合考虑了网络传输过程中的网络诱导时延,有无数据包丢失和错序等问题,研究时延与采样周期的选择、丢包率等控制与调度协作问题。

### 1.2.2 输入受限

近年来, NCSs 输入受约束的问题引起了国内外学者的广泛关注, 关于这类问题的研究不仅具有理论意义, 更具有重要的实际意义。在实际的控制系统中, 如虚拟制造、化学装置、机械装备制造系统, 往往控制输入受到约束。执行器饱和往往会严重影响系统的各项性能, 甚至导致系统不稳定, 以至于引发重大事故<sup>[91]</sup>。如果不考虑输入受限, 所得的控制器很难使系统镇定。由于网络诱导时延、数据包丢失和错序等非理想因素的存在, 使 NCSs 的饱和和执行器问题变得更加复杂。文献[92]将有控制约束的状态反馈网络控制系统建模为含有不确定性的离散时变系统, 利用 Lyapunov 理论和 LMIs 方法, 获得系统鲁棒稳定的充要条件。文献[91]将 NCSs 建模为具有时变时延的随机系统, 给出具有饱和和执行器的 NCSs 均方稳定的充分条件。然而, 文献[91]、[92]仅研究在短时延情况下 NCSs 的输入受限问题。文献[93]对控制器施加饱和和非线性约束, 研究了具有分布时延、有限输入的多输入多输出网络控制系统的建模和稳定性问题, 获得了时滞依赖稳定性判据, 同时得到了保证系统稳定的 MADB。但是, 上述文献均未考虑到数据包丢失情况。目前关于具有饱和和非线性约束的 NCSs 的文献还不多见, 尤其是针对网络诱导时延、丢包、不确定性、干扰、性能等问题, 建立更一般的具有饱和和非线性约束的 NCSs 模型, 分析其性能, 还未得到充分的研究。

### 1.2.3 控制方法

目前, 研究网络控制系统的控制与优化问题, 一般采用 Riccati 等式<sup>[94~96]</sup>和 LMIs 技术<sup>[62, 34, 36, 40, 71~74]</sup>。通过 Lyapunov 方法, 稳定性判据可以表示成 LMIs 形式, 利用强大的 Matlab 工具箱容易获得控制器。因而, 基于 Lyapunov 方法的 LMIs 技术在控制系统的研究中非常盛行。针对具有网络诱导时延和数据包丢失的 NCSs, 设出增广向量, 建立增广系统, 给出最简单的二次 Lyapunov 函数, 对系统分析与控制<sup>[61, 97]</sup>, 形如式(1.2); 将 NCSs 建成切换系统或 Markov 跳变系统, 给出切换 Lyapunov 函数<sup>[98~100]</sup>, 形如式(1.3); 以时滞方式, 给出利用系统时延界、丢包界等信息的 Lyapunov 泛函<sup>[44, 54, 60]</sup>, 形如式(1.4); 文献[101]~[103]应用广义系统方式, 形如式(1.5), 获得基于 LMIs 的稳定性判据, Gao<sup>[104]</sup>将这种方法扩展到随机时滞系统。还有非二次 Lyapunov 函数<sup>[105]</sup>等其他 Lyapunov 函数方法。为获得少于保守的结果, 文献[106]采用多种策略改进 Lyapunov 函数。

$$V_k = \mathbf{z}_k^T \mathbf{P} \mathbf{z}_k \quad (1.2)$$

其中,  $\mathbf{z}_k = [\mathbf{x}_k^T \quad \mathbf{x}_{k-1}^T \quad \cdots \quad \mathbf{x}_{k-h}^T]^T$ ;  $\mathbf{x}_k$  和  $\mathbf{x}_{k-i}$  ( $i=1, 2, \cdots, h$ ) 分别为系统状态和滞后状态;  $h$  为正整数;  $\mathbf{P}$  为正定矩阵。

$$V(\mathbf{x}_k, k) = \mathbf{x}_k^T \mathbf{P}(i, r) \mathbf{x}_k \quad (1.3)$$

其中,  $\mathbf{x}_k$  为系统状态;  $\tau_k = i$  为传感器-控制器时延;  $d_{k-1} = r$  为控制器-执行器时延;  $\mathbf{P}(i, r)$  为正定矩阵。

$$V(t) = \mathbf{x}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{x}(t) + \int_{t-\eta}^t \int_s^t \mathbf{x}^T(v) \mathbf{T} \mathbf{x}(v) dv ds \quad (1.4)$$

其中,  $\mathbf{x}(t)$  为系统状态;  $\mathbf{P}$  和  $\mathbf{T}$  为正定矩阵。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A} \mathbf{x}_k + \mathbf{A}_d \mathbf{x}_{k-h} \\ &= (\mathbf{A} + \mathbf{A}_d) \mathbf{x}_k - \mathbf{A}_d \sum_{i=k-h}^{k-1} \mathbf{y}_{(i)} \end{aligned} \quad (1.5)$$

其中,  $\mathbf{x}_k$  和  $\mathbf{x}_{k-h}$  分别为系统状态和滞后状态;  $h$  为正整数;  $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{y}_k$ ;  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{A}_d$  为适维矩阵。

工程系统的设计和分析已表明图论有着广泛的应用。事实上,在各种各样的工程领域,系统的各种图的表示现在非常普遍<sup>[107~110]</sup>。但是,到目前为止,在NCSs的研究中几乎没有涉及图论的应用。正因为如此,这项工作更具有挑战性。很明显,对于NCSs而言,首要解决的问题就是系统的图的稳定性。

#### 1.2.4 能控性与能观性

能控性和能观性问题一直是动态系统研究的重点。大量研究致力于连续系统、离散系统(定常时滞)和广义系统的能控性和能观性<sup>[111~114]</sup>。由于NCSs中存在网络诱导时延和数据包丢失等其他非理想因素,传统控制理论中能控性、能观性理论应用到NCSs时必须重新考虑,虽然对NCSs的研究已取得了较多的成果<sup>[79~85, 88~99, 115~118]</sup>,但是关于能控性、能观性问题的研究还少见报道。文献[119]针对线性定常离散被控对象,研究原始连续系统与经网络后离散时滞系统能控性和能观性的等价问题。然而,文献[119]假定网络时延是定常的。实际应用中的网络控制系统,多数情况是原始系统为连续系统,且网络诱导时延时变。文献[120]给出网络控制系统的均值能控、均方能控、均值能观、均方能观的充分或必要条件。忽略了由于网络中存在网络诱导时延和数据包丢失现象,连续系统经网络采样后能控性、能观性是否改变的问题以及时变时延对系统能控性、能观性的影响。

文献[121]给出著名的“采样能控性”条件:线性定常连续系统经等距采样( $T$  恒定)和零阶保持器后,如果采样周期  $T$  满足对矩阵  $\mathbf{A}$  的每两个特征值,有  $T(\lambda_1 - \lambda_2) \neq 2\pi k j, k \in \mathbf{Z}$  且  $k \neq 0$ , 则采样后离散系统能控性不变。然而,NCSs中由于网络诱导时延和数据包丢失的存在,连续系统经网络离散后系统是否能保持能控性、能观性不变,且时延是否对NCSs的能控性、能观性产生影响,还未得到深入研究。

#### 1.2.5 多输入多输出

被控对象为多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)NCSs,即

系统中多个传感器、多个控制器和多个执行器之间通过网络平台连接,信息通过网络由多个信道传输。由于每个信道都不可避免地存在网络诱导时延、数据包丢失和错序等不确定因素,与单信道网络传输相比,MIMO 系统的分析与控制变得更加复杂<sup>[122]</sup>。MIMO NCSs 框图如图 1.2 所示<sup>[122]</sup>。

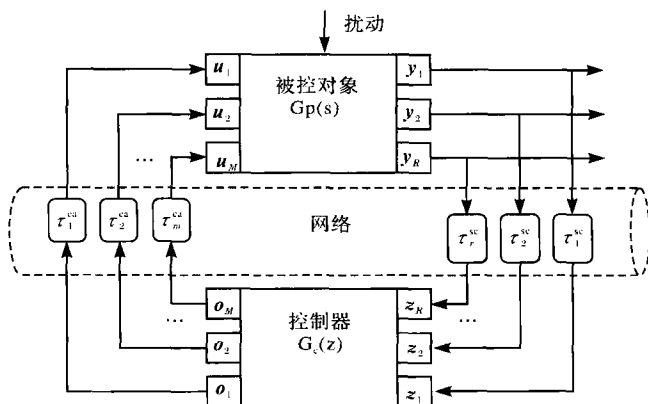


图 1.2 带扰动的 MIMO 网络控制系统结构图

其中,  $y_i, z_i, u_j, o_j$  ( $i=1, 2, \dots, R, j=1, 2, \dots, M$ ) 分别表示被控输出、控制器输入、被控输入、控制器输出。

在研究 MIMO NCSs 的初始阶段,为简化系统分析,往往假定传感器-控制器为多包传输<sup>[116,123]</sup>,后来发展到研究传感器-控制器、控制器-执行器均为多包传输的系统分析和控制<sup>[124~126]</sup>。由最开始的仅仅是系统建模,发展到控制器设计。对于建模方法一般有建立增广系统模型<sup>[116,123,126]</sup>、多时滞连续模型<sup>[124,125]</sup>、多时滞离散<sup>[127]</sup>模型。文献[128]分析了具有数据包丢失和多包传输的 NCSs 的指数稳定性。依据具有事件率约束的异步动态系统理论,建立了多包传输网络控制系统模型,给出了判定系统指数稳定性的充分条件。文献[116]假定控制器和传感器节点均采用时钟驱动方式工作,执行器节点采用事件驱动方式,根据现场总线网络的传输特征,将多包传输 NCSs 建模为切换控制系统,给出 NCSs 指数稳定的充分条件。文献[129]考虑网络诱导时延和系统的不确定性,利用 Lyapunov 稳定性理论提出了新的基于 LMIs 形式的时滞相关稳定条件,获得 MIMO NCSs 的 MADB。然而,研究 MIMO NCSs 的文献还不多见,基于 MIMO NCSs 的性能优化有待进一步深入研究。

### 1.2.6 有限传输

NCSs 的一个优点就是能够实现资源共享,往往多个用户终端共享网络资源,而有限的网络带宽和通信速率将造成网络资源的分配不均衡,导致控制性能降