

万雄波 吴敏 王子栋 著

复杂网络化系统 故障检测与状态估计



科学出版社

复杂网络化系统故障检测 与状态估计

万雄波 吴敏 王子栋 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合作者多年来的研究成果,系统阐述了复杂网络化系统建模、故障检测与状态估计的理论和方法。主要内容包括:绪论、随机丢包的网络化分布时滞系统故障检测、具有丢包和时滞的网络化系统故障检测、具有多种诱导现象的全局 Lipschitz 非线性系统故障检测、动态事件触发的奇异摄动系统故障检测、Round-Robin 协议下的离散时间奇异摄动复杂网络 H_∞ 状态估计、马尔可夫跳变时滞型基因调控网络鲁棒非脆弱 H_∞ 状态估计、Round-Robin 协议下的基因调控网络最终有界状态估计、随机通信协议下的基因调控网络状态估计。

本书可作为高等学校自动化及相关专业研究生和高年级本科生的参考书,也可为控制科学与工程等领域相关工程技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂网络化系统故障检测与状态估计/万雄波,吴敏,王子栋著. —北京:科学出版社,2019.11

ISBN 978-7-03-062887-9

I. ①复… II. ①万… ②吴… ③王… III. ①计算机网络-自动控制系统-研究 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 242296 号

责任编辑:朱英彪 王 苏 / 责任校对:王萌萌

责任印制:吴兆东 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 11 月第 一 版 开本:720 × 1000 B5

2019 年 11 月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:292 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

网络化系统是指用数字通信网络实现分布在不同区域的传感器、控制器和执行器等部件之间信息传递与交换的系统,具有低成本、低能耗、安装和维护简单且方便等诸多优点,在遥操作机器人、智能交通、远程医疗诊断等多个领域获得了广泛应用。然而,由于网络带宽有限,数据包在传输过程中容易出现丢失、延迟、量化、乱序等各种网络诱导现象。这些现象都可能降低系统性能甚至导致系统失稳。因此,网络化系统的分析和综合问题研究备受关注。

随着科学技术的不断进步和生产、生活水平的不断提高,人们对系统安全性和可靠性的要求越来越高。尤其是近年来飞机失事、火车相撞、轮船倾翻等事故频发,更促使人们密切关注故障检测问题。由于实际网络化系统的规模日益庞大、结构日趋复杂,任何微小的故障都可能导致整个系统瘫痪,甚至引发不可估量的后果,因此对网络化系统故障检测问题的研究显得十分迫切。网络化系统中存在的各种网络诱导现象,使得传统的故障检测方法不再适用于网络化系统,需要提出针对网络化系统的故障检测理论和方法。

在实践和科学研究中,往往需要准确了解系统的状态信息。例如,在生物制药和医学诊断中,了解患者的某些指标可针对性地开展疾病排查和药物治疗;在系统控制中,了解系统的状态便于设计控制律以实现系统的有效控制等。然而,对于许多复杂网络化系统,通常只能获得其测量输出,而不能直接获得状态信息。复杂网络化系统的测量输出受外界噪声、测量时滞、测量信息丢失等多种因素的影响,与系统的真实状态可能相去甚远。如何基于系统的测量信息获得系统状态信息,就涉及系统状态估计问题。因此,复杂网络化系统状态估计也是迫切需要研究的重要问题。

本书共 9 章。第 1 章是绪论。第 2~5 章讨论不完整量测网络化系统故障检测问题,其中第 2 章讨论随机丢包的网络化分布时滞系统故障检测问题,第 3 章讨论具有丢包和时滞的网络化系统故障检测问题,第 4 章讨论具有多种诱导现象的全局 Lipschitz 非线性系统故障检测问题,同时考虑网络诱导时滞、丢包、介质访问受限、量化等现象的影响,第 5 章讨论基于动态事件触发的奇异摄动系统故障检测问题。第 6~9 章讨论复杂网络化系统(含离散时间奇异摄动复杂网络和基因调控网络)的状态估计问题,其中第 6 章讨论 Round-Robin 协议下的离散时间奇异摄动复杂网络 H_∞ 状态估计问题,第 7 章讨论马尔可夫跳变时滞型基因调控网络鲁棒非脆弱 H_∞ 状态估计问题,第 8 章讨论 Round-Robin 协议下的基因调控网

络最终有界状态估计问题，第 9 章讨论随机通信协议下的基因调控网络状态估计问题。

本书内容主要源于国家自然科学基金面上项目“调度时间和通信状态相关事件混合驱动的网络化系统故障检测”(61673356)和重点项目“复杂地质钻进过程智能控制”(61733016)、湖北省自然科学基金创新群体项目(2015CFA010)以及教育部高等学校学科创新引智计划项目(B17040)的研究成果。作者由衷感谢日本秋田县立大学(Akita Prefectural University)徐粒教授在研究工作中给予的大力支持。同时,非常感谢中国地质大学(武汉)先进控制与智能化研究所赖旭芝教授、何勇教授、余锦华教授、曹卫华教授、陈鑫教授、熊永华教授、张传科教授、安剑奇副教授、陈略峰副教授、刘振焘副教授等在本书写作过程中给予的大力帮助。任传玉、李健康、韩体壮、方泽林、李勇志、鲁黎等研究生承担了本书的部分文字整理、录入工作,在此深表谢意。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2019年4月

主要符号表

\mathbb{R}^n	n 维欧几里得空间
$\mathbb{R}^{n \times m}$	$n \times m$ 阶实矩阵集合
I	单位矩阵
*	矩阵中对称元素
$E\{\cdot\}$	数学期望
$\text{Var}\{\cdot\}$	方差
\mathbb{Z}^+	非负整数集合
\mathbb{Z}^-	非正整数集合
$l_2[0, \infty)$	区间 $[0, \infty)$ 上平方可求和序列空间
$l_2([0, N]; \mathbb{R}^r)$	区间 $[0, N)$ 上平方可求和的 r 维向量函数空间
$\text{Prob}\{\cdot\}$	事件概率
\otimes	Kronecker 积
\cup	并集
$ \cdot $	绝对值
$\ \cdot\ $	欧几里得范数
$\ \cdot\ _F$	Frobenius 范数
$P > 0$ ($P \geq 0$)	P 为正定 (半正定) 矩阵
A^\dagger	矩阵 A 的 Moore-Penrose 广义逆
$\sup\{\cdot\}$	上确界
$\text{diag}\{\dots\}$	对角矩阵
$\exp(\cdot)$	以自然常数 e 为底的指数函数
$\lambda(A)$	矩阵 A 的特征值
$\text{tr}\{A\}$	矩阵 A 的迹
A^T	矩阵 A 的转置
A^{-1}	矩阵 A 的逆

目 录

前言

主要符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 网络诱导现象及其建模	2
1.2.1 丢包	2
1.2.2 通信时滞	3
1.2.3 介质访问受限	4
1.2.4 量化	5
1.2.5 多种不完整量测	6
1.3 复杂网络化系统故障检测	6
1.4 复杂网络化系统状态估计	8
1.4.1 复杂动态网络状态估计	8
1.4.2 基因调控网络状态估计	9
1.5 本书主要内容	10
参考文献	12
第 2 章 随机丢包的网络化分布时滞系统故障检测	26
2.1 引言	26
2.2 具有随机丢包的网络化系统建模	27
2.2.1 系统模型	27
2.2.2 丢包现象与闭环系统建模	27
2.3 残差评估函数与阈值	29
2.4 相关引理	29
2.5 H_∞ 性能分析与故障检测滤波器设计	29
2.5.1 H_∞ 性能分析	30
2.5.2 故障检测滤波器设计	32
2.6 仿真实例	33
2.7 本章小结	35
参考文献	35

第 3 章 具有丢包和时滞的网络化系统故障检测	39
3.1 引言	39
3.2 具有丢包和时滞的全局 Lipschitz 非线性系统故障检测	40
3.2.1 丢包和时滞统一建模及问题描述	40
3.2.2 H_∞ 性能分析与故障检测滤波器设计	42
3.2.3 仿真实例	49
3.3 基于隐马尔可夫模型的网络化奇异摄动系统故障检测	51
3.3.1 问题描述	51
3.3.2 相关引理	54
3.3.3 H_∞ 性能分析与隐马尔可夫型故障检测滤波器设计	56
3.3.4 仿真实例	63
3.4 本章小结	66
参考文献	66
第 4 章 具有多种诱导现象的全局 Lipschitz 非线性系统故障检测	70
4.1 引言	70
4.2 具有介质访问受限、丢包和时滞的网络化系统故障检测	71
4.2.1 基于切换、随机与时滞方法的网络化系统建模	71
4.2.2 残差产生器与滤波误差系统	72
4.2.3 H_∞ 性能分析与模态相关故障检测滤波器设计	73
4.2.4 仿真实例	79
4.3 具有丢包、时滞及量化的全局 Lipschitz 非线性系统故障检测	81
4.3.1 考虑丢包补偿的多种网络诱导现象统一建模	81
4.3.2 H_∞ 性能分析与模态相关故障检测滤波器设计	84
4.3.3 仿真实例	96
4.4 本章小结	98
参考文献	98
第 5 章 动态事件触发的奇异摄动系统故障检测	101
5.1 引言	101
5.2 事件触发的奇异摄动系统故障检测问题	102
5.2.1 动态事件触发的模型描述	102
5.2.2 残差产生器与滤波误差系统	103
5.3 H_∞ 性能分析与故障检测滤波器设计	104
5.3.1 H_∞ 性能分析	105
5.3.2 故障检测滤波器设计	107
5.4 仿真实例	108

5.5	本章小结	110
	参考文献	111
第 6 章	Round-Robin 协议下的离散时间奇异摄动复杂网络 H_∞ 状态估计	113
6.1	引言	113
6.2	离散时间非线性奇异摄动复杂网络 H_∞ 状态估计	114
6.2.1	离散时间非线性奇异摄动复杂网络建模	114
6.2.2	非线性奇异摄动复杂网络的远程状态估计问题	115
6.2.3	H_∞ 性能分析与状态估计器设计	120
6.3	离散时间线性奇异摄动复杂网络 H_∞ 状态估计	126
6.3.1	线性奇异摄动复杂网络模型及估计误差系统	126
6.3.2	H_∞ 性能分析与状态估计器设计	127
6.4	仿真实例	128
6.5	本章小结	133
	参考文献	133
第 7 章	马尔可夫跳变时滞型基因调控网络鲁棒非脆弱 H_∞ 状态估计	136
7.1	引言	136
7.2	具有马尔可夫跳变时滞的基因调控网络的状态估计问题	137
7.2.1	具有马尔可夫跳变时滞的基因调控网络建模	137
7.2.2	状态估计器及估计误差系统	139
7.3	H_∞ 性能分析及鲁棒非脆弱估计器设计	142
7.3.1	H_∞ 性能分析	142
7.3.2	状态估计器设计	148
7.4	仿真实例	153
7.5	本章小结	159
	参考文献	159
第 8 章	Round-Robin 协议下的基因调控网络最终有界状态估计	161
8.1	引言	161
8.2	Round-Robin 协议下的基因调控网络状态估计问题	162
8.2.1	离散时间基因调控网络模型	162
8.2.2	估计器与估计误差系统	163
8.3	估计性能分析与估计器设计	166
8.3.1	指数最终有界性分析	166
8.3.2	状态估计器设计	172
8.4	仿真实例	175

8.5 本章小结 178

参考文献 179

第 9 章 随机通信协议下的基因调控网络状态估计 181

9.1 引言 181

9.2 基因调控网络有限时间 H_∞ 状态估计 182

9.2.1 问题描述 182

9.2.2 随机 H_∞ 有限时间有界性分析与估计器设计 187

9.2.3 仿真实例 195

9.3 基于递归方法的量化 H_∞ 状态估计 198

9.3.1 时变基因调控网络建模与状态估计问题 198

9.3.2 有限时域 H_∞ 性能分析与时变状态估计器设计 205

9.3.3 仿真实例 214

9.4 本章小结 217

参考文献 217

第1章 绪 论

1.1 引 言

复杂网络化系统是指分布在不同区域的节点或部件(如传感器、控制器和执行器等)通过网络实现信息交换与传递的系统,不仅包括采用数字通信网络进行数据传递的典型网络化系统,也包括具有强耦合性和复杂动力学行为的复杂动态网络。与传统系统的点对点的连接方式相比,典型网络化系统由于采用数字通信网络实现数据包传输,带来了诸多优点,如布线成本降低、电缆重量减轻、能耗降低、安装和维护方便、可靠性提高^[1,2]等。复杂动态网络通常具有复杂的拓扑结构,可以描述许多典型的人工系统和自然系统,如交通运输网络、信息网络、社会网络、生物网络等。研究这类复杂动态网络可以揭示其呈现的复杂动力学行为的内在机理,便于对其进行进一步的分析和设计。伴随着网络技术的飞速发展,复杂网络化系统在工业自动化、移动传感器网络、无人飞行器、机器人、交通运输、自动公路系统、远程外科手术等领域得到了广泛的应用^[3,4],大量相关研究成果也见诸报道。

复杂网络化系统中,当采用带宽有限的数字通信网络传输系统测量输出数据包时,将产生各种不完整量测现象。由于网络带宽有限,某时刻可能只允许部分节点获得网络通信权限,这就需要考虑介质访问受限的问题;网络拥塞、数据碰撞、节点故障等可能导致数据包传输过程中信息延迟甚至丢失;有限的带宽会导致数据率约束,因此系统的测量数据需经过量化才能通过网络传输,这又导致量化误差的产生。这些不完整量测现象不仅会降低系统性能,甚至导致系统失稳,同时增加了网络化系统分析和设计的复杂性^[5]。不考虑这些不完整量测现象,直接采用传统控制理论和方法得出的系统分析和设计的结论显然并不适用于复杂网络化系统。随着科学技术的不断发展和网络技术的广泛应用,迫切需要在充分考虑各种不完整量测现象的前提下开展复杂网络化系统的研究。

作为提高系统安全性和可靠性的一项重要技术,故障检测是复杂网络化系统研究的重要方向。复杂网络化系统规模日益庞大、结构日趋复杂,一旦发生故障就可能造成巨大的危害。特别是近年来,火车追尾、飞机失事、厂矿爆炸等事故频发,故障检测问题受到了更多的关注^[6-10]。在实践中,各种复杂因素的制约致使需要对系统进行远程故障检测。例如,对于一些高辐射系统,人为近距离地获取系统的测量输出十分困难而且非常危险。通过网络传输传感器采集的数据包进行远程故障检测不失为一种好的方法,这就涉及复杂网络化系统故障检测问题。随着复杂网络

化系统的广泛应用以及人们对系统安全性与可靠性要求的提高,其故障检测问题逐渐成为研究的热点。

状态估计是复杂网络化系统研究的另一个重要方向。在实践和科学研究中,往往需要了解复杂网络化系统的状态信息。例如,在生物制药和医学诊断中,了解基因调控网络 (genetic regulatory networks, GRN) 这一复杂网络化系统的状态信息是十分必要的,不仅有利于揭示 GRN 复杂的调控机理,而且有利于针对性地对某些基因异常导致的疾病开展药物治疗。此外,了解复杂网络化系统的状态便于设计控制律实现系统的有效控制。然而,对于许多复杂网络化系统,往往只能获得其测量输出,而不能直接获得状态信息。由于受外界噪声、测量时滞、测量丢失等因素的影响,复杂网络化系统的测量输出往往与系统的真实状态差别很大。如何基于这些测量信息获得复杂网络化系统的状态信息,就涉及状态估计的问题。因此,复杂网络化系统状态估计也是迫切需要研究的重要问题。

综上所述,本书将基于各种不完整量测现象的分析,探讨复杂网络化系统故障检测与状态估计问题。

1.2 网络诱导现象及其建模

网络化系统中,有限的网络带宽会导致各种网络诱导现象,这些现象往往不仅使系统性能下降甚至失稳,而且增加了网络化系统分析和设计的复杂度。为了对网络化系统进行有效的分析和综合,通常需要建立描述各种网络诱导现象的模型。典型的网络诱导现象及其建模方法概述如下。

1.2.1 丢包

丢包是复杂网络化系统中的常见现象,通常分为被动丢包和主动丢包。网络拥塞、节点故障、连接中断等原因导致的丢包称为被动丢包,而由于数据实时性的要求,在接收到新的数据包后主动放弃过时的数据包,这种丢包称为主动丢包。十几年来,提出的描述丢包现象的模型有随机模型、切换模型、时滞模型等,相关研究已取得了丰硕的成果^[11-16]。

伯努利随机变量模型是一类被广泛采用的描述丢包现象的模型。基于该模型,文献 [12] 研究了具有范数有界不确定性的随机丢包的系统鲁棒 H_∞ 控制问题;文献 [13] 和文献 [14] 分别研究了测量丢失情形下具有范数有界不确定性的常时滞系统的鲁棒 H_∞ 滤波和鲁棒 H_∞ 控制问题;文献 [15] 研究了随机测量丢失的范数有界不确定性系统的协方差约束控制问题。此外,基于伯努利随机变量模型,并考虑对象自身的非线性、模态切换等特性以及传输的方式(如单包或多包),又得到了很多扩展的结论。例如,考虑到测量丢失情形下的几类非线性系统,文献 [16]~文

献 [18] 分别研究了网络化系统的 H_∞ 滤波、鲁棒协方差约束滤波及 H_∞ 输出反馈控制问题; 考虑到丢包导致的被控对象输入和观测器输入的差异, 文献 [19] 讨论了一类网络化全局 Lipschitz 非线性系统基于观测器的 H_∞ 控制问题; 文献 [20] 研究了随机测量丢失的离散时间切换系统的鲁棒 H_∞ 滤波问题; 文献 [21] 研究了多包传输情形下随机丢包的一类随机非线性系统的鲁棒滤波问题。

当丢包发生时, 通常可采用两种补偿方式, 第一种为 0 输入补偿, 第二种为用最近一次到达的数据包补偿当前丢失的数据包, 其中第一种补偿方式使用较多。第二种补偿方式是由 Sahebsara 等^[22, 23] 提出的。在文献 [22] 和文献 [23] 中, 采用伯努利随机变量模型并考虑第二种补偿方式, 分别研究了具有丢包的网络化系统的最优 H_∞ 滤波和最优 H_2 滤波问题。采用具有第二种补偿方式的丢包模型, 获得了很多扩展的结果。例如, 文献 [24] 研究了具有丢包的网络化系统的 H_∞ 控制问题; 文献 [25] 研究了丢包和静态量化下网络化系统的输出反馈控制问题; 文献 [26] 研究了多包传输情形下随机丢包的网络化系统的 H_∞ 滤波问题。此外, 有学者专门致力于网络化系统丢包补偿的研究。例如, 文献 [27] 充分利用闲置的传输信道来补偿当前信道的数据包丢失; 文献 [28] 提出三种方法 (比例微分方法、比例二阶微分方法、比例三阶微分方法) 补偿网络化系统控制包丢失。

除了上述随机方法外, 还可采用切换方法描述丢包。例如, 文献 [29] 采用切换序列描述从传感器到滤波器通道的丢包, 进而研究了网络化系统的 H_∞ 滤波问题; 文献 [30] 假定传感器到控制器以及控制器到执行器两个通道都存在丢包, 采用切换系统方法研究了网络化系统的输出反馈镇定问题。时滞系统方法是处理网络化系统丢包问题的另一类重要方法。例如, 文献 [31] 将丢包描述成时变时滞, 进而研究了离散时间网络化系统的稳定性问题。

1.2.2 通信时滞

通信时滞是导致复杂网络化系统性能下降甚至失稳的重要原因之一, 因而一直是研究的热点。处理通信时滞通常需要采用时滞系统相关方法, 主要包括早期的伴随使用特殊不等式的模型转换方法^[32-34] (这些不等式包括 Park 不等式^[35]、Moon 不等式^[36]、Jensen 不等式^[37-39] 等)、自由权矩阵方法^[40-42]、时滞分解方法^[43, 44], 以及近年来提出的基于一些新的积分不等式^[45-47]、有限项和不等式^[48-50] 的转换方法等。

具有通信时滞, 尤其是随机通信时滞的复杂网络化系统的研究历来受到高度关注。描述随机通信时滞的常用方法之一是伯努利随机变量方法。例如, 采用伯努利随机序列, Yang 等^[51] 研究了从传感器到控制器以及控制器到执行器通道均存在随机 1 步通信时滞的情况下网络化系统的 H_∞ 控制问题; 进一步地, 文献 [52] 研究了具有随机 1 步通信时滞的网络化系统的故障检测问题; 文献 [53] 讨论了从

传感器到滤波器存在随机 1 步通信时滞时网络化离散时间系统的 H_∞ 滤波问题; 文献 [54] 讨论了具有随机 1 步通信时滞的非线性随机系统的 H_∞ 滤波问题。上述文献研究了具有随机 1 步通信时滞的网络化系统的相关问题, 而在实际的网络化系统中, 由于各种因素的影响, 数据包随机发生的时滞往往不限于 1 步时滞。为此, 文献 [55] 研究了具有随机传感变时滞的连续时间系统的 H_∞ 输出反馈控制问题。

描述随机通信时滞的另一类重要方法是马尔可夫链方法。例如, Ma 等^[56] 基于一种执行器时间分段驱动的方法, 采用马尔可夫链描述时滞, 讨论了网络化系统的均方指数稳定问题; 霍志红等^[57] 采用马尔可夫链方法研究了一类具有随机时滞的网络化系统的容错控制问题; 文献 [58] 采用马尔可夫链描述传感器到控制器以及控制器到执行器的通信时滞, 在此基础上研究了网络化系统的输出反馈镇定问题; Yang 等^[59-61] 也采用马尔可夫链方法, 获得了网络化系统的一些重要研究成果。

除了上述伯努利随机变量方法和马尔可夫链方法外, 具有非一致分布特征的随机时滞方法也得到了广泛的研究。Gao 等^[62] 假定时滞依据给定的概率取值于一个有限的集合, 基于离散时间系统的该非一致分布模型, 研究了网络化系统的镇定问题。对于连续型时滞非一致分布情形, Peng 等^[63] 研究了网络化连续时间系统的稳定性分析和控制器设计问题。

上述网络化系统的研究针对的大多是离散时间系统 (文献 [55]、文献 [56] 和文献 [63] 除外)。在研究连续时间网络化系统时, 文献 [55] 和文献 [63] 也是直接采用连续时间系统的形式展开讨论。但在实际网络化系统中, 通信网络传输的是数字信号, 因而需要将连续时间系统进行离散化。由于时滞的影响, 如果不采取特殊的驱动方法 (如文献 [56] 采用执行器时间分段驱动), 离散化后的闭环系统的系统矩阵往往是含有时滞的时变矩阵。常用的处理技巧是将该时变矩阵分离成范数有界不确定性或多面体不确定性的形式, 进而采用鲁棒控制的方法进行研究。例如, 采用范数有界不确定性方法, 文献 [64] 讨论了具有长时滞的一类网络化非线性系统的非脆弱控制问题, 文献 [65] 研究了具有短时滞的网络化线性系统的镇定问题, 文献 [66] 研究了具有短时滞的网络化系统的鲁棒 H_∞ 观测器和控制器设计问题; 基于多面体不确定性方法, 文献 [67] 研究了具有长时滞或短时滞的网络化系统的故障检测问题。

除上述随机时滞方法和鲁棒控制方法外, 通信时滞的另一类重要研究方法是切换系统方法。例如, Zhang 等^[68, 69] 将具有短时滞的网络化系统建模成切换系统, 并采用平均驻留时间法, 分别研究了网络化系统的镇定和 H_∞ 控制问题。

1.2.3 介质访问受限

当多个节点共享网络时, 由于网络资源有限, 为了缓解多个节点同时访问网络

造成的数据冲突,需要采用一定的通信协议合理分配网络资源,使节点遵循既定的规律依次获得通信权限。换言之,每时刻只有部分或唯一节点可以访问网络,即介质访问受限。网络化系统介质访问受限现象十分普遍。早期,通常采用周期性通信序列或切换序列描述介质访问受限。例如,Wang 等^[6,7]采用周期通信序列调度节点对网络的访问,进而研究了具有介质访问受限的网络化系统故障检测问题;宗群等^[70]采用切换系统方法研究介质访问受限下网络化系统的稳定性和控制器设计问题。此外,在研究介质访问受限时,还可同时考虑其他网络诱导现象的影响。例如,文献 [71] 采用切换系统方法描述介质访问受限,并同时研究了具有介质访问受限、量化以及丢包的网络化系统的 H_∞ 滤波问题。

近年来,针对实际网络化系统中三类典型通信协议,即轮转 (Round-Robin) 协议^[72-74]、试一次丢弃 (try-once-discard, TOD) 协议 (或称最大误差优先协议)^[75-77] 以及随机通信协议 (stochastic communication protocol, SCP)^[78-80],从通信协议的数学建模以及通信协议下网络化系统的分析与综合等方面,开展了大量的研究工作。Round-Robin 协议是一种周期性通信协议。在 Round-Robin 协议下,任意周期内每个节点均获得一次通信权限,因此, Round-Robin 协议是一种资源平均分配的协议。TOD 协议是一种二次型协议,在该协议下,如果某节点的最近一次传输值和当前值的误差绝对值最大,则该节点获得通信权限。不同于前两种确定性协议,在 SCP 下,每时刻允许部分或唯一节点根据给定的概率分布随机地获得通信权限。关于 Round-Robin 协议和 SCP,本书后续部分章节将进行详细讨论。关于 TOD 协议,读者可查阅相关文献。

1.2.4 量化

网络化系统中,传输的数字信号往往假定具有足够的精度。事实上,由于网络带宽、通信设备及计算精度的影响,在实际的网络化系统中,数据需要经过量化才能通过网络传输。因此,为了更准确地对系统进行分析与设计,必须考虑量化效应。

通常使用的量化器有两种类型,即静态量化器和动态量化器。Fu 等^[81]针对一类称为对数量化器的静态量化器,提出了一种扇形界方法描述量化误差,进而采用鲁棒控制的方法解决量化问题。在此基础上,Gao 等^[82]进一步研究了静态量化,提出了一种量化相关的 Lyapunov 函数,从而获得了保守性更小的结论。基于上述扇形界方法,网络化系统量化问题获得了广泛的研究。文献 [25] 讨论了在静态量化和丢包情形下离散时间网络化系统的输出反馈控制问题;文献 [83] 采用时滞系统方法,综合考虑了具有丢包、时滞和量化输入的网络化系统的稳定性和镇定问题。此外,其他静态量化问题也得到了很多研究。例如,王志文等^[84]研究了均匀量化下基于模型的网络化系统的稳定性问题;Liu 等^[77]研究了在 TOD 协议和均匀量化

下的集员状态估计问题。常用的动态量化器是由可调缩放参数和静态量化器构成的。采用该动态量化器且同时考虑量化范围的影响,文献 [85]~文献 [87] 分别研究了离散时间线性系统的动态输出反馈 H_∞ 控制、状态反馈 H_∞ 控制以及 H_∞ 滤波问题。

1.2.5 多种不完整量测

在复杂网络化系统方面,上述网络诱导丢包、时滞、介质访问受限、量化等不完整量测现象大多是单独研究的。但是,在实际网络化系统中,由于带宽有限,上述各种现象都可能发生。因此,需要研究同时描述多种不完整量测现象的方法,并建立这些现象的统一模型,进而研究网络化系统的分析与综合问题。具有多种不完整量测现象的网络化系统的几种典型建模方法概述如下。

1) 时滞系统方法

Yue 等^[88] 同时考虑丢包、时滞和乱序等不完整量测现象,基于几个假设将网络化系统建模成时滞界已知的时变时滞系统,进而采用时滞系统方法研究网络化系统。基于该时滞系统模型,得到了许多推广结论^[89-96]。此外,其他学者也提出过类似的思想,将具有丢包和时滞等现象的网络化系统建模成时滞系统,进而采用时滞系统的观点研究网络化系统^[97-102]。

2) 马尔可夫链方法

He 等^[8,9] 采用马尔可夫链和 Kronecker- δ 函数,建立了同时描述丢包和时滞现象的统一模型。该模型假设数据包通过网络传输到接收端过程中,根据转移概率已知的马尔可夫链,随机发生如下 $q+2$ 种情形:无时滞、具有 1 步时滞、具有 2 步时滞、...、具有 q 步时滞、丢包。类似地,文献 [10]、文献 [11] 和文献 [103] 假设随机发生上述 $q+2$ 种情形的概率已知,提出了另一种描述随机丢包和时滞的统一模型,并分别研究了网络化系统故障检测和滤波问题。

3) 切换系统方法

文献 [104] 假设网络产生的时滞为短时滞,控制器为事件驱动,传感器为时间驱动,执行器为时间分段驱动,并将闭环状态反馈控制系统建模成切换系统,进而采用平均驻留时间法研究了具有丢包和时滞的网络化系统的 H_∞ 控制问题。

本书第 3 章提出同时描述丢包和时滞现象的两种新模型,第 4 章介绍描述三种及以上不完整量测现象的新模型,并基于这些模型研究网络化系统的故障检测问题。

1.3 复杂网络化系统故障检测

随着网络技术的不断发展及其在生产、生活等各领域深入广泛的应用,复杂网

络化系统的性能、安全性和可靠性受到极大关注,其故障检测问题也成为研究热点之一。系统故障检测的基本思路是:首先,构造残差向量,根据该残差向量确定一个残差评估函数。其次,将残差评估函数值与给定阈值进行比较,如果残差评估函数值大于阈值,则检测到故障并报警。目前故障检测方法可分为基于解析模型的方法、基于知识的方法以及基于信号处理的方法。其中,基于解析模型的故障检测方法较为成熟,获得了较多的关注^[105-111]。其通常做法是,引入一些性能指标描述残差对故障的敏感性以及残差对扰动的鲁棒性,进而将故障检测问题转化成相关最优化问题^[108-111],从而利用现有的 H_∞ 滤波等方法解决。

在采用 1.2 节的方法建立描述丢包、时滞、介质访问受限以及量化等一种或多种网络诱导现象的模型后,通常可采用基于解析模型的方法开展网络化系统故障检测。尽管网络化系统镇定和状态估计等问题的研究成果丰硕,但故障检测的研究成果相对较少。Fang 等^[112-114] 开展了网络化系统故障诊断研究,并总结了早期成果。随着研究的深入,网络化系统故障检测有了很大的研究进展,主要成果包括介质访问受限的网络化系统故障检测^[6,7]、具有时滞的网络化系统故障检测^[52,67,115,116] 以及具有丢包的网络化系统故障检测^[117-121]。在故障检测方法方面,有等价空间方法^[6,7,113,122]、基于观测器或滤波器的方法^[8-10,115,123,124] 等。在上述研究基础上,王永强等^[125] 综述了网络化系统故障检测问题新的研究进展。

过去的十余年间,许多学者致力于研究具有丢包、时滞、介质访问受限和量化误差等多种诱导现象的网络化系统故障检测问题^[8-10,123,124,126,127]。例如,He 等^[10] 利用 Kronecker- δ 函数建立了新的网络传输模型,进而研究了具有丢包、时滞和量化的网络化系统故障检测问题;文献 [123] 采用时滞系统方法研究了具有丢包、时滞等现象的网络化系统故障检测问题;Zhang 等^[126] 研究了具有丢包和非一致分布随机时滞的网络化系统故障检测问题;文献 [127] 综合采用切换和随机方法描述网络诱导现象,进而研究了具有丢包和介质访问受限的网络化系统故障检测问题。针对具有更多诱导现象的网络化系统,如何提出更合理更实用的模型,进而研究其故障检测问题,值得进一步探讨。

近年来,事件触发通信机制下的网络化系统故障检测问题受到了广泛关注。事件触发通信机制的引入是为了节省有限的网络资源,提高网络资源的利用效率。目前,已取得了大量基于静态事件触发通信机制的网络化系统故障检测研究成果^[128-133]。但是,基于动态事件触发通信机制的网络化系统故障检测研究成果十分少见(文献 [134] 和文献 [135] 除外)。文献 [134] 和文献 [135] 分别研究了多智能体系统和正马尔可夫跳变系统。但是,在文献 [135] 中,动态事件触发通信机制的动态特性主要体现在马尔可夫系统的模态切换上。当考虑不具有模态切换的系统故障检测问题时,文献 [135] 中的动态事件触发通信机制将退化为静态事件触发通信机制;作为文献 [136] 中连续时间动态事件触发通信机制对应的一种离散形式,文