

时滞系统分析、控制及诊断

李 涛 张保勇 著



科学出版社

时滞系统分析、控制及诊断

李 涛 张保勇 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对具有不同结构的多类时滞系统,研究了时滞相关稳定性分析方法、控制策略及故障诊断问题.针对线性系统建立新型的具有更小保守性的增广 L-K 泛函稳定分析法,针对非线性系统建立具有更小运算量的多界依赖稳定分析法.在此基础上,进一步对具有时滞的线性时不变系统、马尔可夫跳变系统、模糊系统、挠性航天器设计了多类型时滞相关的控制策略,有效地降低了时滞对控制性能的影响.此外,本书也对延时网络控制系统、时滞非高斯随机分布系统进行了故障检测和诊断研究,所得到的结论说明了诊断设计中考虑时滞信息对降低故障漏报率具有积极作用.

本书可供从事控制理论及其应用研究的科研工作者、工程技术人员、高校教师和研究生阅读和参考.

图书在版编目(CIP)数据

时滞系统分析、控制及诊断/李涛,张保勇著. —北京:科学出版社, 2015.11

ISBN 978-7-03-046368-5

I. ①时… II. ①李… ②张… III. ①时滞系统-研究 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 271196 号

责任编辑:李涪汁/责任校对:郑金红

责任印制:徐晓晨/封面设计:许 瑞

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2015 年 11 月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:307 000

定价:89.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

时滞(即时间上的滞后或延迟)现象广泛存在于电路、机械、通讯网络、生物、经济等实际领域.时滞对控制系统性能的影响很大,甚至会导致系统失稳.因此,研究时滞特性影响下的控制系统分析与设计具有很重要的理论意义和应用价值,近年来引起了众多研究者的关注,成为系统与控制领域的重要研究方向.

时滞系统理论的研究已有很长的历史.早在 20 世纪 50 ~60 年代,包括 Krasovskii、Razumikhin 等在内的一批优秀科学家就对其进行了研究,建立了解的存在与唯一性以及零解的稳定性等基本理论.此后,时滞系统分析与综合问题的研究逐渐活跃起来,研究范围不仅涵盖了稳定性分析、模型降阶、状态估计、不同目标约束下的控制器设计等分支,更是涉及了神经系统、切换系统、模糊系统、随机系统等许多具有复杂结构的动态模型.

时滞系统本质上是无穷维系统,对其深入分析和研究是较为困难的,必须针对不同时滞系统的结构特点和不同的控制问题进行具体的分析和处理.本书针对具有不同结构的多类时滞系统,研究了其时滞相关稳定性分析方法、控制策略及故障诊断问题.第 1 章综述了时滞系统的稳定、控制及故障诊断的发展现状.第 2 章和第 3 章针对时滞线性系统、时滞神经网络系统,分别建立新型的具有更小保守性的稳定性判据.第 4 章从降低算法复杂性的角度出发,对上述系统稳定性判据进行简化,减少了决策变量的数目.第 5 章至第 8 章分别对具有时滞的线性时不变系统、马尔可夫跳变系统、模糊系统、挠性航天器设计了多类型时滞相关的控制策略,有效地降低了时滞对控制系统性能的影响.在第 9 章至第 10 章对延时网络控制系统、时滞非高斯随机分布系统进行了故障检测和诊断研究,所得结论表明在设计中充分考虑时滞信息将对提升故障检测灵敏性及故障诊断准确性具有积极作用.

本书相关研究工作得到了众多科研机构的支持.特别感谢国家自然科学基金委员会资助的面上项目(61573189)“受扰时滞系统抗干扰故障重构研究”,(61473151)“时滞参数变化系统稳定、控制与滤波研究”,江苏省自然科学基金委员会资助的省杰出青年基金项目(BK20140045)“多源干扰时滞系统鲁棒故障诊断研究”,江苏省高校优秀科技创新团队计划资助的“微网智能控制”(苏教办科(2015)4 号).本书作者李涛、张保勇分别在东南大学的郭雷教授、南京理工大学的徐胜元教授指导

下进行了许多研究工作,受益匪浅. 在本书正式出版之际,谨向他们表示衷心的感谢! 科学出版社的编辑为本书的出版付出了辛勤劳动,在此一并致谢!

由于作者知识水平有限,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正.

李 涛

2015 年 8 月于南京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 时滞系统	1
1.2 时滞系统的稳定性研究概述	2
1.3 时滞系统的控制研究概述	4
1.4 时滞系统故障诊断研究概述	5
1.5 本书的主要研究工作	6
第 2 章 时滞线性系统时滞相关稳定性分析 —— 增广 L-K 泛函法	9
2.1 引言	9
2.2 系统描述	10
2.3 标称时滞系统的稳定性	12
2.3.1 含自由权矩阵的增广型 L-K 泛函法	13
2.3.2 不含自由权矩阵的增广型 L-K 泛函法	17
2.3.3 仿真与案例研究	23
2.4 线性分式型不确定时滞系统的稳定性	25
2.4.1 鲁棒稳定性分析	25
2.4.2 数值算例	29
2.5 本章小结	30
第 3 章 时滞神经网络系统时滞相关稳定性分析 —— 多界依赖法	31
3.1 引言	31
3.2 连续时间系统情形	31
3.2.1 系统描述	31
3.2.2 渐近稳定性分析	33
3.2.3 数值例子	39
3.3 离散时间系统情形	41
3.3.1 系统描述	41
3.3.2 指数稳定性判据	43
3.3.3 数值算例	51
3.4 本章小结	52

第 4 章 时滞相关稳定判据的等价性分析	53
4.1 引言	53
4.2 线性时滞系统稳定判据等价性	53
4.2.1 系统描述	53
4.2.2 区间变时滞类型	54
4.2.3 区间快变时滞类型	59
4.2.4 常时滞类型	61
4.2.5 数值算例	62
4.3 时滞神经网络系统稳定判据等价性	63
4.3.1 不含自由权矩阵的稳定判据	63
4.3.2 等价性分析	67
4.3.3 数值例子	71
4.4 本章小结	72
第 5 章 线性时不变系统的时滞相关稳定与控制	73
5.1 引言	73
5.2 连续时间系统情形	73
5.2.1 问题描述	73
5.2.2 稳定性分析	74
5.2.3 H_∞ 控制器设计	78
5.2.4 数值算例	86
5.3 离散时间系统情形	88
5.3.1 系统描述	88
5.3.2 稳定性判据	89
5.3.3 有记忆控制器设计	92
5.3.4 数值算例	94
5.4 本章小结	95
第 6 章 时滞马尔可夫跳变系统的时滞相关稳定与控制	97
6.1 引言	97
6.2 稳定性分析	99
6.2.1 系统描述	99
6.2.2 稳定性判据	100
6.2.3 数值算例	103
6.3 输入饱和约束下的镇定	104
6.3.1 问题描述	104

6.3.2	状态反馈控制器设计	106
6.3.3	输出反馈控制器设计	108
6.4	无源化控制	111
6.4.1	问题描述	111
6.4.2	无源性分析	113
6.4.3	状态反馈控制器设计	117
6.4.4	输出反馈控制器设计	121
6.4.5	数值算例	126
6.5	本章小结	129
第 7 章	离散时间 T-S 模糊时滞系统的时滞相关控制	130
7.1	引言	130
7.2	广义 H_2 控制	131
7.2.1	问题描述	131
7.2.2	广义 H_2 性能分析	134
7.2.3	模糊控制器设计	141
7.2.4	数值算例	144
7.3	鲁棒 H_∞ 控制	145
7.3.1	问题描述	145
7.3.2	H_∞ 性能分析	148
7.3.3	模糊控制器设计	157
7.3.4	数值算例	163
7.4	本章小结	167
第 8 章	含输入时滞的挠性航天器时滞相关抗干扰姿态控制	168
8.1	引言	168
8.2	基于 H_∞ 的抗干扰控制	169
8.2.1	含单一干扰的航天器模型	169
8.2.2	H_∞ 控制器设计	170
8.2.3	时滞相关 H_∞ 控制器增益求解	170
8.3	复合抗干扰姿态控制	175
8.3.1	含两类干扰的航天器模型	175
8.3.2	干扰观测器设计	175
8.3.3	复合控制器设计与求取	176
8.4	数值仿真与结果分析	182
8.4.1	时滞大小对姿态控制效果的影响	182

8.4.2	分解参数 a 对姿态控制效果的影响	183
8.4.3	复合控制对姿态的影响	184
8.5	本章小结	185
第 9 章	延时网络控制系统的故障检测	186
9.1	引言	186
9.2	延时网络控制系统模型	187
9.2.1	一般结构	187
9.2.2	含延时、丢包、量化的模型	188
9.3	含网络信息的故障检测观测器	190
9.3.1	复合性能指标	190
9.3.2	故障检测滤波器	190
9.4	故障检测阈值	195
9.4.1	阈值选取	195
9.4.2	检测算法优化	196
9.5	数值仿真	198
9.6	本章小结	200
第 10 章	时滞非高斯随机分布系统的故障诊断	201
10.1	引言	201
10.2	系统描述	202
10.3	故障检测	203
10.3.1	残差生成器	204
10.3.2	故障评估器	210
10.3.3	故障检测基于优化算法	210
10.4	含时滞和建模误差的故障检测	212
10.4.1	系统描述	212
10.4.2	时滞相关故障鲁棒检测观测器设计	212
10.4.3	故障检测阈值	216
10.5	故障估计	216
10.5.1	故障估计器设计	216
10.5.2	故障估计算法	217
10.6	仿真与结果分析	219
10.7	本章小结	221
	参考文献	222

第1章 绪 论

1.1 时滞系统

在如图 1.1 所示的网络化控制系统之中^[1,2], 被控对象的输出信号 $y(t)$ 从传感器端传输到控制器端, 需要通过一个有限带宽的数字通信网络. 由于信道带宽、传输速率和传输距离等因素的限制, 信号在网络中传输往往需要一定的时间, 因此控制器端收到的信号一般不是当前信号 $y(t)$, 而是 τ^{sc} 个单位时间以前的信号, 即 $y(t - \tau^{sc})$. 需要说明的是, 我们在这里考虑的是抽象化了的简单网络化控制系统模型, 未考虑采样、编码、解码等环节, 亦未考虑数据丢包等因素. 信号 $y(t)$ 在传输过程中所需要的时间 τ^{sc} 被称为网络传输延迟^[2], 通常也被称为时滞. 网络化控制系统可以看作是理解时滞存在现象的一个直观例子. 一般而言, 如果系统的状态变化率不仅与当前的状态有关, 而且还与过去的某段时间的状态有关, 则这个“过去的某段时间”即称为时滞^[3]. 人们发现, 时滞现象普遍存在于生物、经济、工程等许多实际领域之中^[4-6].

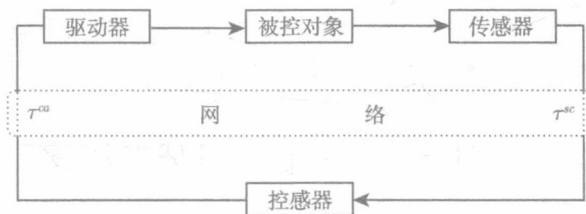


图 1.1 网络化控制系统^[2]

具有时滞特性的系统称为时滞系统^[3], 英文文献中多称为 time-delay systems, 也有文献称为 systems with aftereffect, systems with dead-time, hereditary systems, equations with deviating argument 或 differential-difference equations^[6]. 时滞系统通常由泛函微分方程所描述, 其形式为^[7]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) - D\dot{x}(t-d) = f(t, x_t), & t \geq 0 \\ x(t) = \varphi(t), & -\max\{d, \tau\} \leq t \leq 0 \end{cases} \quad (1.1.1)$$

其中, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 表示状态向量; $x_t = x(t + \theta)$, $\theta \in [-\tau, 0]$; $f(\cdot)$ 是与时间、当前状态以及过去状态有关的连续函数向量, 关于第二个变量满足局部 Lipschitz 条件, 并且

$f(t, 0) = 0$; $\varphi(t)$ 是 $[-\max\{d, \tau\}, 0]$ 上的连续函数向量, 表示初始条件; $D \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为已知实值常数矩阵. 如果 $D = 0$, 则称式 (1.1.1) 为 Retarded 系统; 反之如果 $D \neq 0$, 则称式 (1.1.1) 为中立 (Neutral) 系统.

系统式 (1.1.1) 中的正实数 $d \in \mathbb{R}_+$ 和 $\tau \in \mathbb{R}_+$ 表示时滞. 如果 d 和 τ 为常数, 则称其为定常时滞; 如果 d 和 τ 是随时间 t 变化的函数, 则称其为时变时滞, 也简称变时滞. 因为时滞 τ 含在系统的状态变量之中, 故称 τ 为状态时滞, 也称为离散时滞 (Discrete Delay). 与之相对应的另一种时滞类型是输入时滞, 即系统的控制输入变量中所含有的时滞. 图 1.1 中从控制器端到驱动器端的网络传输延迟 τ^{ca} 便可视为输入时滞. 当系统式 (1.1.1) 带有输入时滞 h 时, 其形式为^[6,7]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) - D\dot{x}(t-d) = f(t, x_t, u_t), & t \geq 0 \\ x(t) = \varphi(t), & -\max\{d, h, \tau\} \leq t \leq 0 \end{cases} \quad (1.1.2)$$

其中, $u_t = x(t+\theta)$, $\theta \in [-h, 0]$; $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 表示控制输入向量.

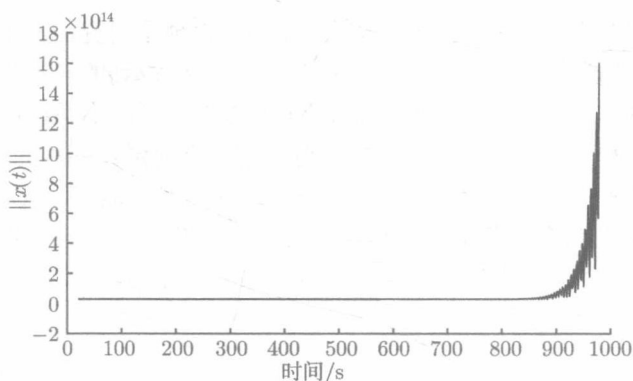
时滞系统理论的研究已有很长的历史. 早在 20 世纪 50~60 年代, 包括 Pontryagin、Krasovskii、Razumikhin 等在内的一批优秀科学家就对上述泛函微分方程进行了研究, 建立了解的存在与唯一性以及零解的稳定性等基本理论^[3,7,8]. 此后, 时滞系统分析与综合问题的研究逐渐活跃起来, 涌现出了大量文献和成果, 研究范围不仅涵盖了稳定性分析、模型降阶、状态估计、不同目标约束下的控制器设计等分支^[3,5,6,8-48], 更是涉及到了非线性系统、广义系统、切换系统、模糊系统、随机系统等许多具有复杂结构的动态模型^[49-56]. 时至今日, 时滞系统分析与综合问题的研究已成为控制理论领域的一个重要研究方向.

1.2 时滞系统的稳定性研究概述

系统稳定性是控制理论中的基本概念^[57]. 在研究系统特性或者设计控制器时, 分析系统的稳定性是一个首要的任务. 研究发现, 时滞的存在往往会导致系统不稳定. 例如, 考虑如下具有定常时滞的线性时不变系统:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -1.5 & 0 \\ 0 & -0.5 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} x(t-\tau) \quad (1.2.1)$$

显然, 当系统式 (1.2.1) 不含有时滞时是渐近稳定的. 现在我们取 $\tau = 4$, 并假设初值为 $[0.001 \quad -0.001]^T$, 则系统状态向量的范数的仿真曲线如图 1.2 所示. 由该图不难看出, 当时滞为 4 时, 系统式 (1.2.1) 是不稳定的. 这也进一步表明, 时滞对系统稳定性的影响是不容忽视的, 研究时滞系统的稳定性分析问题具有重要的理论意义.

图 1.2 时滞系统式 (1.2.1) 的仿真结果 ($\tau = 4$)

对具有定常时滞的线性时不变系统, 我们可以通过检验特征方程的根是否具有负实部来判定系统的稳定性. 然而, 此时的特征方程是一个超越方程, 具有很大的求解难度^[3,7,8]. 另外, 这一方法也很难推广到具有时变时滞的系统、不确定时滞系统 and 非线性时滞系统等复杂的系统模型^[6], 这就在很大程度上限制了其应用范围. 对具有一般形式的时滞系统, 文献中多采用 Lyapunov 函数方法和 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法 (也简称 L-K 泛函方法) 来讨论其稳定性, 依据分别是 Razumikhin 和 Krasovskii 建立起来的稳定性定理^[7]. 根据 Razumikhin 稳定性定理, 我们需要构造一个适当的 Lyapunov 函数, 然后计算该函数沿系统的导数, 便可获得系统稳定的充分条件. 需要指出的是, 我们构造 Lyapunov 函数时不需要考虑时滞的信息, 因此这种方法容易用来处理系统具有时变时滞但时滞不可微的情形. L-K 泛函方法的思想是, 先构造一个显含时滞的正定泛函, 然后计算该泛函沿系统的导数, 根据 Krasovskii 稳定性定理得到系统稳定的充分条件. 因为 L-K 泛函方法更多地考虑了时滞的信息, 所以它与基于 Razumikhin 稳定性定理的 Lyapunov 函数方法通常具有更小的保守性, 从而成为近年来研究时滞系统稳定性问题的一种主要方法^[3,6,27].

文献中有关时滞系统稳定性的判定条件可分为两类: 时滞无关条件^[10-13] 和时滞相关条件^[3,5,14-27]. 前者对时滞的大小没有要求, 所以满足时滞无关条件的系统对任意尺寸的时滞都是稳定的. 这样的稳定性判定条件无疑具有很大的保守性, 因为我们总能找到一些时滞系统, 它们在时滞比较大的情况下是不稳定的, 而当时滞比较小时却是稳定的. 例如, 当 $\tau = 4$ 时, 系统式 (1.2.1) 是不稳定的; 而当 $\tau = 1.5$ 时, 系统式 (1.2.1) 中的系数矩阵参数满足文献 [25] 中的稳定性判定条件, 所以系统式 (1.2.1) 在时滞为 1.5 时是渐近稳定的. 文献 [25] 中的结论是时滞相关条件, 这类条件包含时滞的上界等信息, 通常比时滞无关条件具有较小的保守性. 需要指出的是, 基于时域分析方法所获得的时滞相关稳定性条件只是充分的, 而非必要的, 从而在一定程度上仍然具有保守性. 寻找保守性小且易于验证的时滞相关条件, 拓展

这些结论的应用范围,成为近十年来时滞系统稳定性理论研究的一个非常活跃的分支;这类问题在文献中称为时滞相关稳定性分析问题,得到的时滞相关条件称为时滞相关稳定性判据.文献 [3,47] 中的绪论部分简要介绍了时滞系统的时滞相关稳定性分析问题的发展历程.文献 [27] 主要针对具有定常时滞的线性时不变系统,综述了近年来基于线性矩阵不等式 (linear matrix inequality, 简称 LMI^[45]) 方法所得到的时滞相关稳定性判据.文献 [26] 指出了某些时滞相关稳定性判据在本质上是等价的.虽然时滞系统的稳定性问题研究已取得很多成果,但对算法保守性及简化性问题仍然值得进一步研究.

1.3 时滞系统的控制研究概述

时滞系统的控制问题一般描述为:针对能控的不稳定时滞系统,设计状态反馈控制器或者输出反馈控制器,使得闭环系统是稳定的并且满足指定的性能约束.与无时滞系统一样,时滞系统的状态反馈控制器是以系统的状态向量直接作为反馈信号,此时的状态必须是完全可测的.然而,系统的状态完全可测往往是一个理想假设,在很多时候我们只能量测到部分状态或者状态的某种组合关系,我们量测到的这种信号称为量测输出.在这种情况下,我们只能将量测输出作为反馈信号来设计控制器,这正是输出反馈控制器得以提出的原因.另一方面,根据系统模型和设计要求的不同,时滞系统的控制问题包括镇定、保成本控制、无源化控制、 H_∞ 控制、 H_2 控制、自适应控制、变结构控制、具有饱和输入约束的控制等.这些控制问题具有通用的研究思路,但具体到分析与设计方法,却各有各的不同.近年来,许多学者致力于这些控制问题的研究,发表了一系列具有重要意义的研究成果,如文献 [3,32–44,46–48]. 这些结论也可分为时滞无关结果和时滞相关结果,前者形式简单,一般对计算量的要求不高;而后者形式较为复杂,对其检验往往是一个非凸问题,需要进一步将其转化成迭代算法.

本书将围绕时滞马尔可夫跳变系统和时滞 T-S 模糊系统来讨论控制器设计问题.自 20 世纪 60 年代 Krasovskii 和 Lidskii 的工作^[58] 之后,马尔可夫跳变系统的分析与综合问题得到了广泛和深入的研究,阶段性的研究成果时有报道^[51,59–67]. 近年来,人们对这一领域的研究兴趣主要集中在时滞马尔可夫跳变系统方面,目的是采用 L-K 泛函方法,建立这类系统控制理论基础.与研究非切换模型不同,分析时滞马尔可夫跳变系统的控制问题时,为了使结果具有较小的保守性,人们需要构造与模态相关的 L-K 泛函,这类泛函实际上是一个随机切换函数,对其处理往往需要比较高的数学技巧.英国 University of Strathclyde 的 Xuerong Mao 及其合作者^[68], 加拿大学者 Boukas 及其合作者^[69–73] 均在时滞马尔可夫跳变系统的鲁棒控制器设计方面开展了大量研究工作.此外,文献 [74–85] 所获得的结论涉及鲁棒

稳定与鲁棒镇定、保成本控制、 H_∞ 控制、 H_∞ 滤波等问题. 值得提及的是, 文献 [69,78,82,84,85] 给出了线性矩阵不等式 (LMI) 形式的时滞相关稳定性判定条件. 而这些文献中所构造的 L-K 泛函具有一定的特殊性, 比如其二重积分项中的正定矩阵是与模态无关的, 从而导致所得结果具有较大的保守性.

人们对时滞模糊系统的关注起始于 2000 年前后, 本书作者检索到的最早的文献是 [86,87]. 在研究模糊系统的控制问题时, 多数文献采用的是公共 Lyapunov 函数方法, 即 Lyapunov 函数中的正定矩阵是固定不变的. 这种方法往往导致结果具有很大的保守性, 因为固定不变的 Lyapunov 矩阵必须同时满足多个不同的 LMI^[88]. 克服这种缺陷的方法之一是使用跟模糊隶属函数有关的 Lyapunov 函数, 这种方法对研究离散时间的模糊系统尤为有效, 详见文献 [89–95]. 特别值得提到的是, 文献 [89,92] 针对带有定常时滞的离散时间模糊系统, 采用模糊 L-K 泛函方法研究了镇定问题, 以 LMI 的形式分别给出了时滞无关结果和时滞相关结果. 采用模糊 L-K 泛函方法研究时滞相关 H_∞ 和广义 H_2 控制问题; 特别是构造新型的模糊 L-K 泛函, 并借助于松弛 LMI 方法, 给出具有较小保守性的时滞相关结果, 是一个有意义的研究课题, 本书将对此类问题进行研究.

1.4 时滞系统故障诊断研究概述

随着科技的迅猛发展, 现代工业系统正朝着大规模、复杂化的方向发展. 这样的复杂大系统一旦发生故障, 就可能带来重大的财产损失和人员伤亡. 如: 2009 年 2 月 23 日, 美国空军历史上最昂贵的价值 14 亿美元一架的 B-2“幽灵” 战机由于当地潮湿气候阻碍了飞机传感器的正常运作, 最终在关岛安德森基地坠毁, 机上所有人员遇难. 因此, 如何提高系统在运行中的安全性与可靠性, 减少安全隐患, 成为现代工程系统中的重大问题. 在此背景下, 故障诊断技术应运而生, 为解决复杂控制系统中的可靠性问题提供了一条新的途径, 已成为人们研究的热点课题.

然而从工程应用的角度讲, 时滞的存在, 导致被控量不能及时反应控制信号的动作. 特别当系统存在干扰或者发生故障时, 由于时滞的存在导致信息的滞后, 执行机构不能对即时信息作出正确的调整, 从而造成系统的性能降低, 甚至会使系统无法稳定运行, 造成设备损坏和人身安全事故. 因此对于时滞系统的故障诊断研究具有重要的理论价值和实际意义.

时滞系统故障诊断 (FD) 技术经过多年的迅速发展, 到目前为止已经出现了基于各种不同原理的众多的方法. 同以往相比, 这些方法不论是检测及时性、诊断精确性, 还是鲁棒性都有很大提高. 按照国际故障诊断领域的学术权威、德国 Frank 教授^[96] 的观点故障诊断技术基本可以划分为: 基于解析模型的方法、基于知识的方法、基于信号处理的方法. 其中基于解析模型的观测器鲁棒故障诊断方法在理

论研究及在实际应用中都取得了令人瞩目的进展^[97-104]。一般而言,基于解析模型 FD 包括两个阶段,一是残差产生;二是残差评价。依据对生成的残差处理方法不同,这些研究成果基本可以分为两类:① 通过将 FD 问题转化为一个最小化问题,使残差对干扰的鲁棒性指标与残差对故障的灵敏度指标的比率最小化。② 将 FD 问题转化为滤波问题,即“最小化”残差与故障(或加权故障)之间的误差。这两类方法目前仍然是主流方法。

另外,类似于时滞系统稳定性的判定条件分类方法,时滞系统的故障诊断方法还可以分为两类,一类是时滞无关的方法^[105,106],一类是时滞相关的方法^[107,108]。由于对时滞影响的考虑出发点不同,因此文献^[107,108]虽然都是时滞相关的结果,但是对时滞处理思想完全不同。如文献^[107]在针对时滞系统设计故障诊断滤波器时,把扰动和故障信号线性分解为受时滞影响和不受时滞影响的两个部分。其中残差对于不受时滞影响的扰动部分进行解耦,避免了时滞系统中残差对扰动全解耦的条件过于苛刻的不足。并设计使残差保持了对没有解耦部分扰动的鲁棒性,这样故障诊断滤波器就在最大限度上保持了对扰动的鲁棒性。而文献^[108]则是设计故障诊断滤波器时,就已考虑时滞影响,从而获得的是含时滞信息的残差信号,通过对时滞量的优化,获得最小化的残差评估函数,从而降低时滞对故障诊断效果的影响。本书将重点讨论在故障诊断观测器或滤波器设计时直接考虑时滞因素,通过一系列方法来降低时滞对检测精度和估计精度的影响。

1.5 本书的主要研究工作

本书的主要工作是围绕带有时滞的神经网络模型、线性时不变系统、马尔可夫跳变系统和 T-S 模糊系统,进一步研究一系列较为重要的稳定与控制问题,旨在提出新的分析与设计方法,获取新的时滞相关结果。具体研究工作分章简述如下:

第 2 章针对变时滞线性系统,通过构造两种不同形式的增广型 L-K 泛函的方法讨论了时滞相关稳定判据的保守性问题。第一种主要利用广义模型变换法与自由权矩阵法相结合的思想,构造了一个包含自由权矩阵的增广型 L-K 泛函,该泛函在求导过程可以避免广义模型变换法在处理交叉项过程中使用 Moon 不等式,同时,由于在求导中采用新型的放缩技巧从而可以降低结果的保守性;第二种主要在传统的 L-K 泛函的基础上通过增加引入交叉项的方法构造增广型 L-K 泛函,该泛函虽然不包含任何通过牛顿-莱布尼茨公式形式引入的自由权矩阵,但引入与交叉项相关的新矩阵可以使获得的 LMI 得到更优解,因此也可以降低现有一些方法的保守性。利用这两种泛函获得的保证系统稳定的时滞相关判据可以推广到具有线性分式型不确定性的系统,得到具有更小保守性的时滞相关鲁棒稳定判据。

第 3 章讨论具有非单调、非可微型激励函数的变时滞神经网络的基于多界依

赖法的时滞相关稳定性问题. 这里分别考虑连续时间和离散时间的神经网络模型. 多界依赖法的主要思想是构造新型的 L-K 泛函, 既包括激励函数界信息和与之相关引入的矩阵, 也包括时滞界信息和与之相关联的矩阵. 通过与现有的一些文献的结果相比较, 可以看出本章所得到的稳定判据能够获得更大的容许时滞界, 从而具有更小的保守性.

第 4 章针对具有区间变时滞、区间快变时滞、常时滞三种不同时滞类型的时滞线性系统, 分别给出不包含任何自由权矩阵的简化型时滞相关稳定性条件. 这些条件虽然和某些包含自由权矩阵的稳定条件是等价的, 但其包含的变量少, 算法简单. 在此基础上, 进一步推广到时滞神经网络系统的稳定判据的等价性证明, 从而简化判据的算法复杂性, 获得了更为简洁的稳定判据.

第 5 章针对带有定常离散时滞和分布时滞的中立系统, 通过构造合适的 L-K 泛函, 并借助于 Jensen 积分不等式, 获得了 LMI 形式的时滞相关稳定性判据. 数值算例表明, 我们所获得的稳定性判据与文献 [23] 相比具有更小的保守性. 在此基础上进一步讨论了状态反馈 H_∞ 控制问题, 获得了期望控制器存在的新结果, 同时提供了期望控制器的具体设计算法. 其次, 针对带有区间时变时滞的离散时间线性系统, 构造了新型的 L-K 泛函, 获得了新的时滞相关稳定性判定条件. 数值算例表明, 所得结果与文献 [24,32,44,109] 相比具有更小的保守性. 在此基础上进一步研究了有记忆状态反馈控制问题, 获得了期望控制器存在的新结果.

第 6 章在时滞马尔科夫跳变系统稳定性分析方面, 构造了新型的与模态相关的 L-K 泛函, 获得了新的时滞相关稳定性判据, 改进了 [69,76,78,82, 84,85] 等文献中的结论. 在基于输入饱和的全局镇定方面, 提供了状态反馈控制器和输出反馈控制器的存在条件与设计方案. 在无源性分析与无源化控制方面, 获得了保证系统无源的时滞相关新结论, 在此基础上分别获得了状态反馈控制器和输出反馈控制器的存在条件与设计方法. 提供了数值算例, 检验了所得结果的正确性和有效性.

第 7 章针对时变时滞的离散模糊系统的控制器设计问题, 讨论了鲁棒 H_∞ 模糊控制问题; 针对系统模型中含有输入时滞的情况, 讨论了广义 H_2 模糊控制问题. 对于这两种情况, 构造了新型的与模糊隶属函数相关的 L-K 泛函, 并借助于松弛 LMI 方法, 获得了期望控制器存在的新的时滞相关结果, 同时提供了相应的设计方法.

第 8 章主要研究同时具有干扰和时变输入时滞的挠性航天器的抗干扰控制问题. 研究了状态 H_∞ 反馈控制法和基于干扰观测器的复合控制法. 在 H_∞ 反馈控制法中通过在泛函求解过程中引入时滞积分不等式分解系数, 从而降低了设计的保守性. 在复合控制法中, 其核心思想是通过设计一个时滞依赖的控制和干扰观测器相结合的复合分层控制结构, 实现姿态角和姿态角速度的稳定控制. 其中在内环回路中干扰观测器对挠性附件振动所引起的干扰进行估计并进行前馈补偿, 在外环回

路设计相应的控制器对外部干扰进行有效抑制. 本章设计了控制策略均为时滞依赖的形式, 从而有效地降低了时滞对姿态控制的影响.

第 9 章研究了网络通信受限及存在传感器故障的情况下故障检测的滤波器设计. 首先, 建立一个新的模型来描述传输延迟、数据丢失、量化和传感器故障现象, 这些量是网络通信受限的典型要素. 接着, 针对提出的新模型, 设计一个全阶故障检测滤波器, 以保证误差系统的渐近稳定并且实现对干扰的抑制. 此外, 为了提高检测灵敏性, 提出了阈值优化算法. 最后, 通过一个弹簧-质量-阻尼系统的网络控制系统证明了本章方法的有效性.

第 10 章针对具有时滞的随机分布系统研究了故障检测与诊断设计问题. 在文献 [110,111] 提出的基于有理平方根 B 样条模型的输出概率密度函数 (PDF) 的基础上, 通过采用包含松弛矩阵的增广型 Lyapunov 泛函和文献 [112] 中的积分不等式技术, 设计了基于 LMI 的包含时滞信息的故障检测观测器. 对于在故障评估中所选取的阈值, 利用了 H_2 优化算法, 得到了比文献 [113] 具有更高检测灵敏性的故障检测方法. 对于不包含时滞项的随机系统, 也可以采用类似的增广型 Lyapunov 泛函获得相应的故障检测方法. 最后通过仿真例子证明本章方法的有效性.