

本书由浙江海洋学院出版基金和浙江省自然科学基金资助

时滞动力系统的稳定性

理论与应用

刘玉良 著

清华大学出版社

刘玉良 著

时滞动力系统的稳定性

理论与应用

清华大学出版社

内 容 简 介

本书结合多智能体一致性、互联网拥塞控制稳定性、船舶电力系统稳定性等实际问题,重点阐述动力系统的时滞模型产生分岔、混沌等非线性现象的机理以及提高系统稳定性的方法。以通信时延为分岔参数,重点研究了时滞系统动力学模型的分岔条件,对模型进行改进以抑制混沌现象的出现,然后应用摄动法、中心流形法、同伦分析法、Floquet 指数法、滑动平均滤波法等,推导改进模型的非线性稳定性定理,相关结论均通过了仿真验证。本书力求理论与仿真相结合,并附上关键代码,可供理工科高年级本科生、研究生及相关专业教师、相关领域的研究人员和科研工作者自学与参考使用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

时滞动力系统的稳定性理论与应用/刘玉良著.--北京:清华大学出版社,2013
ISBN 978-7-302-33968-7

I. ①时… II. ①刘… III. ①时滞系统—动力系统—稳定性—理论研究
IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 227692 号

责任编辑:孙 坚 洪 英

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市李旗庄少明印装厂

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×230mm 印 张:9 字 数:165 千字

版 次:2013 年 12 月第 1 版 印 次:2013 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:29.00 元

产品编号:055306-01

序

PREFACE

时滞动力学是非线性系统分析中的重要分支,目前的研究主要在数学领域。将非线性分析的方法与理论研究的成果用于工程领域,认识和解释工程现象,探讨解决工程问题的新思路与新方法,一直是应用数学和工程理论研究者关注的问题。

本书作者刘玉良博士 2007 年开始研究时滞系统动力学,先后研究了互联网时滞性和时滞系统动力学模型的分岔与混沌机理,以提高稳定性为主题研究了互联网拥塞控制模型的改进及理论依据。本书在时滞多智能体网络模型同步控制的基础上,以 TCP/AQM 互联网拥塞控制时滞对偶模型、TCP/AQM 互联网拥塞控制流体流模型和 TCP/RED 互联网拥塞控制频闪模型为例,重点揭示时滞性对互联网拥塞控制稳定性的影响。本书不仅在理论研究上具有特色,而且在互联网研究上具有创新性。

本书是一本高水平的、理论与实际相结合的专著,同时附上了关键程序代码,对于初学者具有重要意义,特推荐给广大读者,希望大家喜欢。

华中科技大学自动化学院

齐 欢

2013 年 5 月

前言

FOREWORD

时滞动力系统由于时滞量的存在具有无穷维度,而且随着时滞量的增大将具有异常复杂的动力学特征。互联网拥塞控制系统就属于典型的时滞动力系统,在通信时延、网络拓扑变化等客观因素的影响下,互联网拥塞控制系统还具有明显的非线性特征,它在一定条件下将失去稳定性而呈现出分岔、混沌等奇异现象。此时路由器队列长度以及用户窗口大小将大幅振荡,最终导致网络效率急速下降甚至拥塞崩溃。本书围绕通信时滞如何影响稳定性这一主题,首先研究时滞多智能体的同步一致性,然后重点研究互联网拥塞控制模型的分岔控制和非线性稳定性。

全书共 8 章。

第 1 章为绪论。首先简述时滞、迟滞、分岔、混沌等基本概念和动力系统稳定性分析的基本方法,然后介绍了本书的主要内容和研究来源。

第 2 章以多智能体为例,研究时滞系统的同步一致性问题。首先根据已有的时滞多智能体模型在稳定区、响应速度等方面存在的问题,从提高稳定性的角度对模型进行改进;然后应用频域分析法和几何手段,推导出改进模型的同步一致性条件和使用方法;最后通过两个典型实例和计算机仿真验证该同步一致性条件。

第 3 章分析互联网拥塞控制的动力学模型。首先介绍互联网拥塞控制的概念和背景,分析了几种拥塞控制典型算法的优缺点,包括早期的随机早期探测 RED、改进型 RED 等;然后描述后续章节待深入研究的 3 种模型,即 TCP/AQM 时滞对偶模型、TCP/AQM 流体流模型和 TCP/RED 频闪模型;最后以 TCP/UDP 为例,研究了互联网拥塞控制系统的混沌现象及混沌控制。

第 4 章研究互联网拥塞控制中 TCP/AQM 时滞对偶模型的稳定性。首先通过计算机仿真和线性近似分析,揭示已有的时滞对偶模型存在稳定区较小、容易发生分岔和混沌等问题,提出一种改进模型并给出改进的理论及实际依据;

然后采用摄动法、中心流形定理与正规形理论法等,研究改进模型的分岔方向和分岔周期解的稳定性。

第5章研究互联网拥塞控制 TCP/AQM 流体流模型的稳定性。首先根据已有流体流拥塞控制模型的简化、演变思路及存在的缺陷,提出相应的改进措施;然后从线性和非线性两个层面深入剖析改进模型的稳定性,其中流体流模型的非线性稳定性由推导出的 Floquet 指数的符号来判断。

第6章研究互联网拥塞控制 TCP/RED 频闪模型的分岔控制与稳定性。首先概述基于 TCP 和 RED 的互联网拥塞控制频闪模型的基本特点,以模型的窗口加权因子 w 为分岔参数,通过计算机仿真观察 w 超过某个临界值时,由分岔引起的系统不稳定的现象;然后引入滑动平均滤波器对频闪模型进行改进,使系统的分岔起点延缓出现;最后分析了滑动平均滤波器对频闪模型计算复杂度的影响,用计算机仿真验证了模型的改进效果。

第7章基于同伦分析法求解时滞系统的巨大优势,尝试应用同伦分析法求解时滞对偶模型的周期解,并对运算复杂度和精确度进行对比分析。本章后半部分以双机互联型船舶电力系统为例,分析了电磁干扰对系统稳定性的影响,以及引入延迟反馈算法后时滞量和反馈比例系数对系统稳定性的共同影响。

第8章对全书进行总结和展望。本章系统地总结了本书的研究内容和成果,简要介绍了作者正在进行的与互联网拥塞控制有关的研究工作,同时对将来的研究设想进行了展望。

由于时滞动力系统的稳定性理论涉及知识面广而深,知识应用更是广泛,而作者水平有限,书中难免存在不妥之处,诚请广大读者批评指正。

作者

2013 年 12 月

目录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 时滞动力系统的稳定性	3
1.2 非线性系统的分岔、混沌及 Lyapunov 指数	4
1.3 内容来源	7
1.4 主要内容	7
第 2 章 时滞多智能体的同步一致性	9
2.1 相关的图论知识基础.....	13
2.2 多智能体的动力学模型.....	13
2.3 多智能体动力学模型的改进.....	14
2.4 多智能体动力学模型的同步一致性.....	14
2.5 仿真验证.....	16
2.5.1 仿真例一	16
2.5.2 仿真例二	21
2.6 本章小结.....	23
第 3 章 互联网拥塞控制的动力学模型	25
3.1 路由器结构对互联网拥塞控制的作用.....	28
3.2 路由管理算法对互联网拥塞控制的作用.....	30
3.2.1 主动队列管理算法(AQM)	30
3.2.2 随机早期探测算法(RED)	30
3.2.3 其他改进型 RED	31
3.2.4 TCP/IP 架构与协议简述	33

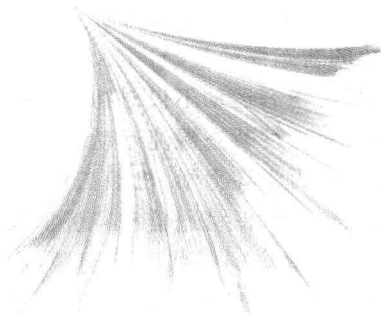
3.3	互联网拥塞控制的动力学模型	36
3.3.1	TCP/AQM 时滞对偶模型	36
3.3.2	TCP/AQM 流体流模型	37
3.3.3	TCP/RED 频闪模型	39
3.3.4	其他拥塞控制模型	40
3.4	互联网拥塞控制模型的混沌与控制	41
3.4.1	TCP/UDP 拥塞控制模型的混沌现象	41
3.4.2	TCP/UDP 拥塞控制模型的混沌控制	43
3.5	本章小结	45
第4章	TCP/AQM 时滞对偶拥塞控制系统的稳定性	47
4.1	引言	49
4.2	TCP/AQM 时滞对偶模型的改进	50
4.3	改进模型的线性稳定性研究	51
4.3.1	临界分岔条件	51
4.3.2	仿真验证	52
4.4	改进模型的非线性稳定性	56
4.4.1	基于摄动法的非线性稳定性研究	56
4.4.2	基于中心流形定理和正规形理论的非线性稳定性研究	62
4.5	本章小结	67
第5章	TCP/AQM 流体流拥塞控制系统的稳定性	69
5.1	引言	71
5.2	TCP/AQM 流体流模型的改进	73
5.3	改进模型的线性稳定性研究	73
5.3.1	改进模型临界分岔的条件	73
5.3.2	仿真结果分析	75
5.4	改进模型的非线性稳定性研究	79
5.4.1	分岔周期解的计算	79
5.4.2	非线性稳定性判据的推导	83
5.4.3	仿真结果分析	85
5.5	本章小结	86

第 6 章 TCP/RED 拥塞控制频闪模型的稳定性	87
6.1 引言	89
6.2 TCP/RED 频闪拥塞控制模型的分岔研究	89
6.2.1 TCP/RED 频闪模型仿真	91
6.2.2 TCP/RED 拥塞控制频闪模型的分岔控制	92
6.3 用滑动平均滤波器控制频闪模型的分岔	94
6.4 选用其他类型滤波器的效果比较	97
6.5 本章小结	98
第 7 章 动力系统的近似求解及时滞稳定性	99
7.1 用同伦法分析互联网拥塞控制动力学模型	101
7.1.1 零阶形变方程	102
7.1.2 一阶形变方程	102
7.1.3 其他阶形变方程	103
7.2 同伦近似解与数值解的比较	103
7.3 船舶电力系统稳定性的时滞影响	105
7.3.1 船舶电力系统的双机互联模型	105
7.3.2 船舶电力系统双机互联模型的混沌现象	106
7.3.3 船舶电力系统双机互联模型的时滞影响	110
7.4 本章小结	112
第 8 章 总结与展望	113
8.1 总结	115
8.2 未来工作展望	116
附录 部分仿真代码	119
参考文献	123
作者已发表论文	132

第1章

绪 论

- 1.1 时滞动力系统的稳定性
- 1.2 非线性系统的分岔、混沌及 Lyapunov 指数
- 1.3 内容来源
- 1.4 主要内容



时滞动力系统,可以定义为一处或多处信号传递有时间延迟的系统。对于一个具体的控制系统而言,时滞可能由测量元件或测量过程造成,也可能由控制元件和执行元件造成,或者由它们共同造成,因此时滞几乎存在于所有的控制系统中^[1]。时滞还能影响动力系统的行为特征,而且时滞大小和非线性通常相互作用共同决定系统的稳定性,这也是时滞动力系统吸引国内外大批学者研究的魅力所在。时滞和迟滞的概念十分相近,在学术界有时不加区分。两者细微差别的一种表述为,时滞反映两个相关动态过程(如观测和控制)任意变化时彼此间的时间滞后关系,常出现在控制系统中;而迟滞则反映两个相关参变过程(如应变和应力)周期变化时彼此间的相位滞后关系,常见于粘弹性材料的本构关系^[2]。按照这种表述,本书内容与时滞有关而不涉及迟滞。

1.1 时滞动力系统的稳定性

稳定性是时滞动力系统永恒不变的研究重点。所谓稳定性就是指时滞动力系统在初始扰动下运动时能回复或趋近平衡状态的性能。时滞动力系统都包含时滞环节,其特点是输出变量相对于输入变量存在时间上的滞后(一般用 τ 表示)。较小的 τ 值对时滞系统的稳定性影响一般也较小,但是较大的 τ 值有可能诱导稳定性突变,通常用临界时滞 τ_c 表征系统稳定运行所允许的时滞上限。分析时滞动力系统的经典方法有苏联学者 A. В. Михайлов 提出的米哈伊洛夫稳定判据(1938)、美国学者 H. Nyquist 提出的奈奎斯特稳定判据等频域法(1932)、俄国数学力学家 A. М. Lyapunov 提出的李雅普诺夫函数法(1892)等时域法。我国学者在时滞稳定性研究方面也取得了很大进展,而且大多与实际

工程问题相结合。文献[3]重点阐述了作者及其团队在稳定性分析、Hopf 分岔计算、利用时滞改善系统稳定性等方面的一些理论和方法研究结果,介绍了时滞对颤振主动控制系统、不稳定系统镇定、网络系统的影响等方面的研究。文献[4]论述了一种具有时滞反馈的磁悬浮轴承系统的暂态混沌现象,用大量数值分析表明,在相当大的时滞取值区间内,该系统的最终稳态运动不仅对初始值极其敏感,而且对反馈环节中的时滞也极其敏感,最后对这种暂态混沌运动现象作了解释。文献[5]总结了我国 1999 年以来时滞系统动力学在力学、机械工程、航空航天、生态学、生物学、神经网络、激光、电子和信息技术、保密通信和经济学等领域的研究进展和经典方法;同时指出在理论上急需解决的一些科学问题,比如以时滞反馈控制为中心的控制策略、非线性因素和时滞联合作用的影响、时滞导致的多级分岔使系统呈现出的复杂动力学行为、以时滞状态变量耦合为中心构成的网络系统计算模型对系统稳定性的影响等科学基础问题。

当前,时滞动力系统稳定性研究的常用方法主要有两类,一类是基于 Lyapunov 函数/泛函的分析方法,另一类是基于时滞动力方程特征根的分析方法。实际应用中,由于构造 Lyapunov 函数/泛函尚无规律可循,且对沿系统轨线的全导数估计依赖于不等式估计技巧,导致这类方法得到的结果常常过于保守,因此特征根法更可行。特征根法的理论依据是,若动力系统微分方程在平衡点的线性化方程没有零实部特征根,则方程零解的局部稳定性与其线性化方程零解的局部稳定性是一致的。特别地,如果线性化方程零解的所有特征根都具有负实部,则该方程的零解渐近稳定,从而原方程的零解也是渐近稳定的。因此,局部稳定性分析的重点就是分析特征根在复平面上的分布情况。本书主要结合作者近年来从事的互联网拥塞控制、多智能体一致性等课题的研究,论述时滞动力系统的稳定性特点和应用。本书的线性稳定性分析部分也主要采用特征根法,就是分析特征根在复平面上的分布情况或者推导临界时滞 τ_c 的表达式,得到系统的临界分岔条件和线性稳定条件,然后针对临界分岔的情况深入进行非线性稳定性研究。本书侧重于研究时滞对动力系统稳定性的影响,所选时滞动力系统大多还是非线性系统。

1.2 非线性系统的分岔、混沌及 Lyapunov 指数

非线性系统的稳定性与分岔、混沌以及定量刻画混沌的 Lyapunov 指数等联系密切。混沌可定义为,确定的宏观的非线性动力系统在一定条件下所呈现的不确定的或不可预测的随机现象,或者是确定性与不确定性、规则性与非规则性或有序性与无序性融为一体的现象^[6-7]。在非线性科学中,混沌现象指的是

一种确定的但不可预测的运动状态^[8-12]。混沌现象的外在表现和纯粹的随机运动很相似,即都不可预测。但和随机运动不同的是,混沌在动力学上是确定的,它的不可预测性来源于运动的不稳定性。混沌系统对无限小初值变动和微扰具有超强的敏感性,无论多小的扰动在长时间以后,也会使系统彻底偏离原来的演化方向。混沌现象是自然界中的普遍现象,比如天气变化就是典型的混沌运动。混沌现象的一个著名表述是蝴蝶效应^[13-15],就是说南美洲一只蝴蝶扇一扇翅膀,有可能在美国佛罗里达引起一场飓风。产生混沌的系统具有三个关键特征:一是对初始条件的敏感依赖性;二是存在临界点,就是非线性事件的发生点;三是分形维,它表明有序和无序的统一。混沌系统经常是自反馈系统,输出的量会回去经过变换再出来,循环往复,而且任何初始值的微小变化都会按指数放大,从而导致系统内在地不可长期预测。

混沌的主要特征量包括 Lyapunov 指数、测度商、分数维等^[16-21]。其中 Lyapunov 指数不仅定性描述了系统动力学行为对初值的极端敏感性,还能定量描述吸引子上相邻轨道的吸引和分离速度,因此分析一个可能的混沌系统时,求解 Lyapunov 指数很关键。在混沌吸引子的伸展方向,两条临近轨道分离;在混沌吸引子的压缩方向,两条临近轨道汇聚。如果用指数函数来近似这种收敛和发散,则伸展和压缩的比率可以用指数来定量描述,这就是所谓的 Lyapunov 指数。由于指数在相空间上是变化的,所以必须取相邻轨道在相空间发散(收敛)的长时间平均指数。Lyapunov 指数的个数等于系统自由度的个数,如果系统具有至少一个正的 Lyapunov 指数,则系统或者是不稳定的,或者是混沌的。如果系统的轨迹是有界的并且具有正的 Lyapunov 指数,则系统中一定包含混沌行为,并且正的指数越大,系统可以预测的时间范围越短。因此计算系统的最大 Lyapunov 指数显得尤为重要。比如,给定一个 m 维相空间中的连续动力学系统,监控一个初始无穷小的球的长期演化,由于流形的局部变形特性,小球可能演变为椭球。第 i 个 Lyapunov 指数可以根据椭球主轴的长度 $l_i(t)$ 定义为^[7,10-12]

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \cdot \ln \left| \frac{l_i(t)}{l_i(0)} \right| \quad (1.1)$$

因此, Lyapunov 指数是和相空间中主轴的扩展和收缩有关,正的 Lyapunov 指数描述了相邻轨迹在某一方向上指数增长的分离,这种特性也导致了动力学行为对初始条件的敏感依赖性,由于椭球的方向是随系统的演化连续变化的,所以和一个给定指数相联系的方向也是沿混沌吸引子以一种复杂的方式变化,因此很难指出一个给定指数所表示的方向。 m 维系统有 m 个 Lyapunov 指数, Lyapunov 指数谱类型还能提供动力学系统的定性情况。例如,当 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \dots) = (-, -, -, -, \dots)$ 时对应不动点,当 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \dots) = (0, -, -, -, \dots)$

时为极限环,当 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \cdots) = (0, 0, -, -, \cdots)$ 时为二维环面,当 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \cdots) = (+, 0, -, -, \cdots)$ 时为混沌,当 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \cdots) = (+, +, 0, -, \cdots)$ 时为超混沌。

非线性动力系统进入混沌状态的原因一般归咎于分岔。混沌学专家 Feigenbaum 曾指出,动力系统若经历倍周期型分岔,即下一级分岔点数是上一级的两倍,则必然导致混沌;他还发现并确定了动力系统由倍周期分岔通向混沌的两个普适常数,即 Feigenbaum 常数。倍周期分岔的典型例子是生态学虫口模型,亦即 Logistic 映射(见图 1-1),它是 1976 年数学生态学家 R. May 在英国《自然》杂志上发表的一篇后来影响深广的综述中所提出的,是最早的由倍周期分岔通向混沌的例子。Logistic 映射的迭代方程为 $x(n+1) = ux(n)[1-x(n)]$, $0 \leq u \leq 4, 0 \leq x \leq 1$ 。对于一维 Logistic 映射,研究得比较早也比较详细,还有人归纳出它具有逆瀑布、周期 3 窗口、U 序列等混沌特性。但是,一维 Logistic 映射仅有一个自由度,利用它只能产生一条线而可视性不强。由于作图像至少需要两个及以上自由度,孙海坚等人人为此给出了 Logistic 映射的图形集 (the logistic map graph set, LMGS) 的定义并进行了扩展,利用扩展的 LMGS 定义构造出了许多美丽的二维 LMGS,这些美丽的图形根据生成方式不同可分成两类图形和吸引子。在此基础上,人们开始分析二维及以上系统的分岔、分析图形与吸引子的结构特征,探讨图形与吸引子之间的联系等。

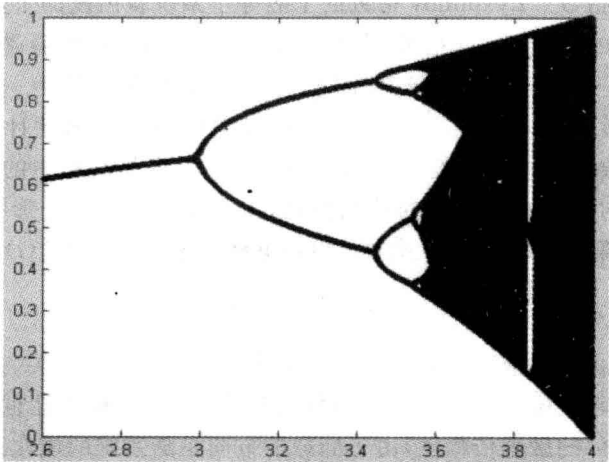


图 1-1 Logistic 映射分岔图

Fig. 1-1 Bifurcation diagram of Logistic mapping

1.3 内容来源

本书内容来源于国家自然科学基金项目(70571017)“INTERNET 网络和混沌神经网络的复杂动力学行为及其应用研究”、浙江省自然科学基金项目(LY12E09004)“遮蔽航区破损进水船非线性横摇的突变机理及稳性衡准研究”、浙江省教育厅科研项目(20070928)“时滞网络的复杂动力学行为及应用研究”的研究成果,以研究时滞对多智能体系统、互联网拥塞控制系统、船舶电力系统的稳定性影响为主题。本书还获得了浙江海洋学院出版基金的资助。

1.4 主要内容

本书主要包括以下几个方面内容。

(1) 时滞多智能体同步一致性。首先根据已有多智能体网络模型在稳定区、响应速度等方面存在的问题,提出了一种改进方法。引进了比例系数 k 来增强同步控制的灵活度,同时在通信接收端引入相同时滞 τ 。然后应用频域分析法和几何法推导出改进模型的同步一致性条件,给出了应用该条件和网络拓扑结构选取时滞 τ 的具体方法。最后,通过计算机仿真证明了同步一致性条件的正确性。

(2) 互联网拥塞控制 TCP/AQM 时滞对偶模型的非线性稳定性。首先论述互联网拥塞控制对偶模型的概念、分类和特点,通过线性化近似分析和计算机仿真,表明已有模型存在稳定区小、易发生分岔和混沌等问题,在此基础上提出了一种改进措施。然后以通信时延为分岔参数重点研究了新模型的分岔条件。分别采用摄动法、中心流形定理和正规形理论研究了新模型的分岔方向和稳定性。两种分析方法的对比表明,摄动法求解思路简明而且运算量小。

(3) 互联网拥塞控制中 TCP/AQM 流体流模型的非线性稳定性。首先论述流体流模型的演变和简化过程,分析了几种简化策略的基本思想和共同存在的问题,从提高稳定性的角度出发提出了一种改进措施。然后从线性近似和非线性两个层面分析了改进模型的稳定性,其中非线性分析基于摄动理论,通过计算得到的 Floquet 指数的正负号来判断分岔周期解的稳定性。相关的研究结果概括为两个定理,并通过计算机仿真进行验证。

(4) 互联网拥塞控制中 TCP/RED 频闪模型的分岔控制和非线性稳定性。首先回顾了 TCP/RED 频闪模型的基本特点。以模型的窗口加权因子 w 为分岔参数,研究由倍周期分岔引起的不稳定性。为扩大模型的稳定工作区,我们将

滑动平均滤波器引入频闪模型。引入滑动平均滤波器后,系统的分岔起点得到明显延缓,还可以通过调节滤波器的尺度来灵活控制频闪模型的稳定区。最后分析了滑动平均滤波器选型对系统运算复杂度的影响,相关的研究结论都通过了计算机仿真验证。

(5) 时滞对动力系统的稳定性影响。分析了时滞对互联网拥塞控制 TCP/AQM 对偶模型稳定性的影响,尝试用同伦分析法求对偶模型的近似解并与数值解比较,还从运算复杂度和精确度两方面说明同伦分析法求解时滞系统的优势。最后以船舶电力系统中双发电机互联模型为例,研究了时滞对船舶电力系统运行稳定性的影响和解决方法。