



同济大学 1907-2017
Tongji University



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

申丽娟 孙继涛 著

随机脉冲系统的 分析与控制

Analysis and Control of Stochastic
Impulsive Systems



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



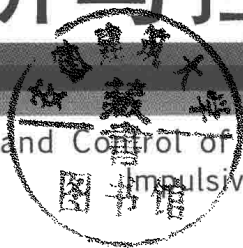
同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

申丽娟 孙继涛 著

随机脉冲系统的 分析与控制

Analysis and Control of Stochastic
Impulsive Systems



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书主要研究随机脉冲系统解的存在唯一性及可控性. 书中讨论了随机脉冲系统解的存在唯一性, 研究了几类随机系统的可控性, 给出了随机脉冲系统 p -阶指数稳定的一些结果.

本书适合对脉冲微分系统理论进行研究的人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

随机脉冲系统的分析与控制 / 申丽娟, 孙继涛著. —上海:
同济大学出版社, 2018. 9

(同济博士论丛/伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-7432-6

I. ①随… II. ①申… ②孙… III. ①脉冲系统—
研究 IV. ①O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 245721 号

随机脉冲系统的分析与控制

申丽娟 孙继涛 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 陈佳蔚 胡晗欣

责任校对 徐逢乔 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店、建筑书店、网络书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 10.5

字 数 210 000

版 次 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-7432-6

定 价 52.00 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关佑红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何品晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城	莫天伟	夏四清	顾 明	顾祥林	钱梦騄
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	阎耀保	黄一如	黄宏伟	黄茂松
戚正武	彭正龙	葛耀君	董德存	蒋昌俊	韩传峰
童小华	曾国荪	楼梦麟	路秉杰	蔡永洁	蔡克峰
薛 雷	霍佳震				

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017 年 5 月

前言

本书主要研究随机脉冲系统解的存在唯一性及可控性. 第2章讨论随机脉冲系统解的存在唯一性, 第3、第4章研究几类随机系统的可控性, 第5章给出了随机脉冲系统 p -阶指数稳定的一些结果. 详细内容如下:

1. 利用 Kuratowski 测度及相应不动点定理研究随机脉冲微分系统解的存在唯一性. 首先将 $[0, T]$ 区间分割成小区间, 利用非紧性测度、不动点定理等考虑了小区间上随机脉冲系统解的存在唯一性, 再通过逐段延拓的方法构造系统在 $[0, T]$ 上的解, 给出了解在 $[0, T]$ 上存在唯一的充分条件.

基于 Schaefer 不动点定理研究了无限区间上随机脉冲微分系统解的存在唯一性. 给出系统解存在唯一的充分条件, 同时将结果退化与已有结果做了对比, 从数值例子可以看出, 所得结果是有效的.

2. 研究具有 Markov 跳的线性离散随机系统的可检测性和可观性. 首先讨论了观测 Gramian 泛函 $\mathcal{E}(m, X)$ 的性质, 并利用此泛函定义系统的可检测性和可观性. 建立了已有相关文献中的可检测性、可观性概念与本书中可检测性和可观性概念的关系. 利用这些等价关系以及

$\mathcal{E}(m, X)$ 的性质,得到了具有 Markov 跳的线性离散随机系统可检测性、可观性的 Hautus 准则等判据及性质. 运用 Hautus 准则和随机 Lyapunov 方程,刻画了不可观空间. 作为理论应用,讨论了可检测性和可观性在随机 Lyapunov 方程和随机离散代数 Riccati 方程(SDARE)中的应用. 结果表明这些概念与已有相关文献中的可检测性、可观性的概念一样,可以保证 SDARE 方程存在反馈稳定解.

研究了 Hilbert 空间中线性随机脉冲系统的可控性. 借助线性随机脉冲系统的伴随系统构造了线性随机脉冲系统的拟倒向系统,通过研究拟倒向系统,得到一系列线性随机脉冲系统零可控、近似可控的充分必要条件,建立了线性随机脉冲系统的零可控和拟倒向随机系统某个初值之间的等价关系.

3. 研究有限维空间中随机脉冲积微分系统的完全可控性. 将完全可控性问题转化为系统温和解算子不动点的存在性问题,利用 Schaefer 不动点定理,研究了系统的完全可控性,并给出了完全可控性的充分条件. 同时给出数值例子说明所得结果的有效性,并将系统退化后与现有结果进行比较.

系统解的存在性是开展可控性、稳定性等定性分析的前提条件,基于这样的考虑,我们利用系统解存在的条件来研究有限维空间中随机系统的相对可控性以及相对近似可控性,得到一系列低保守条件,并将所得结果推广到 Hilbert 空间上.

研究 Hilbert 空间中具有时变时滞的半线性随机脉冲微分系统的近似可控性. 首先将可控性问题转化为温和解算子的不动点存在问题,并借助 Nussbaum 不动点定理及随机分析技巧,将温和解算子分解成两个算子,在 Lipschitz 条件、强连续半群的假设下,得到一系列系统近似可控的充分条件,这些条件去掉了紧算子以及参数组合为 1 的限制,最

后给出数值例子说明所得结果的有效性.

研究 Hilbert 空间中具有无穷时滞的随机脉冲微分系统的近似可控性问题. 运用压缩映射原理及强连续半群建立了系统近似可控性的充分条件. 作为对比, 运用 Nussbaum 不动点定理研究系统的近似可控性, 所得的条件不再要求参数组合小于 1.

4. 研究随机脉冲系统的 p -阶指数稳定性. 依据脉冲频率的变化情况, 借助向量 Lyapunov 函数讨论随机脉冲微分系统的局部 p -阶指数稳定性, 并给出 p -阶指数稳定性的充分条件. 此外, 将以系统右端函数的限制条件代替对 Lyapunov 函数增长率的限制. 最后给出数值例子验证所得结果的有效性, 并与已有文献的结果进行了比较.

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究概况	4
1.2.1 随机微分系统的研究概况	4
1.2.2 脉冲微分系统的研究概况	6
1.2.3 随机脉冲微分系统的研究概况	7
1.3 基本概念	9
1.3.1 脉冲微分系统的描述	9
1.3.2 随机微分系统的基本概念和结果	11
1.3.3 常用记号	14
第 2 章 随机脉冲微分系统解的存在唯一性	15
2.1 有限区间上随机脉冲系统解的存在唯一性	15

2.1.1	预备知识	15
2.1.2	存在唯一性分析	17
2.1.3	例子	24
2.2	无限区间上随机脉冲系统解的存在唯一性	24
2.2.1	预备知识	25
2.2.2	存在唯一性分析	26
第 3 章	线性随机系统的可控性分析	35
3.1	具有 Markov 跳的线性离散随机系统的可检测性和 可观性分析	35
3.1.1	预备知识	36
3.1.2	可检测性分析	40
3.1.3	可观性分析	45
3.1.4	理论应用	48
3.2	Hilbert 空间中线性随机脉冲系统的可控性	50
3.2.1	预备知识	50
3.2.2	可控性分析	54
第 4 章	非线性随机微分系统的可控性	62
4.1	有限维空间中随机脉冲积微分系统的完全可控性	62
4.1.1	预备知识	63
4.1.2	完全可控性分析	66
4.1.3	数值例子	75
4.2	非线性随机系统的相对可控性	77
4.2.1	预备知识	77
4.2.2	n 维空间中的相对可控性分析	80

4.2.3 Hilbert 空间中的相对可控性分析	87
4.2.4 数值例子	89
4.3 具时变时滞的随机脉冲系统的近似可控性	91
4.3.1 预备知识	91
4.3.2 近似可控性分析	95
4.3.3 数值例子	105
4.4 具无穷时滞的随机脉冲泛函系统的近似可控性	106
4.4.1 预备知识	106
4.4.2 近似可控性分析	108
4.4.3 数值例子	115
第 5 章 随机脉冲微分系统的 p-阶指数稳定性	117
5.1 预备知识	117
5.2 p -阶指数稳定性分析	119
5.3 数值例子	129
第 6 章 结论与展望	133
6.1 结论	133
6.2 展望	134
参考文献	136
后记	149

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景

随着工程自动化等技术的完善和广泛应用,在航天技术、信息科学、控制系统等领域相继出现了一类系统,它们在发展的某些阶段,由于外界因素的干扰,会出现快速的变化.干扰和突变过程相比整个发展过程而言,是非常短暂的,这种突变现象通常称为脉冲.像这样存在脉冲现象的发展过程,其数学模型既不同于用微分方程描述的连续系统,也不同于用差分方程描述的离散系统,而是同时包含离散事件过程和连续变量的脉冲微分系统描述.其中的连续变量和数字变量所组成的变化称为连续动态,一般可用微分方程或差分方程来描述,并服从连续系统的运动规律;将离散事件变量或逻辑变量的变化称为逻辑动态,一般用自动机、Petri网或者可数集合上的输入输出转移来描述离散事件系统的演化机制.

脉冲微分系统最突出的特点是能够充分考虑到瞬时突变现象对状态的影响,能够更深刻、更精确地反映事物的变化规律.因此,随着科学技术的突飞猛进,人们越来越认识到脉冲系统的重要性以及在实际中的应用价值.脉冲微分系统不但广泛应用于自然科学,如航天技术、信息科