



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

张瑜 孙继涛 著

脉冲系统的 分析与综合

Analysis and Synthesis of
Impulsive Systems



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



总主编 伍 江 副总主编 雷星晖

张 瑜 孙继涛 著

脉冲系统的 分析与综合

Analysis and Synthesis of
Impulsive Systems

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书较详细地分析了脉冲系统的特点和国内外研究概况,较系统地研究了脉冲系统的定性性质及在控制上的应用.具体涵盖如下六个方面:研究了具有时滞的脉冲线性系统的稳定性;研究了脉冲泛函微分方程的稳定性;研究了变时滞脉冲微分系统的定性性质;研究了在双测度下脉冲系统的定性性质;研究了几类系统的脉冲控制问题;研究了几类复杂脉冲系统的稳定性.

本书可供高校有关专业的教师、学生以及相关领域的研究人员使用.

图书在版编目(CIP)数据

脉冲系统的分析与综合 / 张瑜,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 - 6862 - 2

I. ①脉… II. ①张… ②孙… III. ①脉冲系统 IV.

①O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 073239 号

脉冲系统的分析与综合

张 瑜 孙继涛 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 张智中 胡晗欣

责任校对 徐春莲 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

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 15

字 数 300 000

版 次 2018 年 9 月第 1 版

2018 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5608 - 6862 - 2



定 价 74.00 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	关佶红
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	閻耀保	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!

方 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

脉冲系统的理论研究始于 20 世纪 60 年代. 近些年来, 由于在现实世界中的巨大应用潜力, 脉冲系统吸引了一大批的数学家和控制论专家的注意. 最近 40 多年来, 对脉冲系统的理论研究取得了较为丰富的成果. 20 世纪 80 年代以来, 由于计算机科学的发展, 基于脉冲系统理论的脉冲控制技术也得到了广泛的应用和发展. 实践证明, 脉冲控制技术是一种易于实施和比采用连续控制方法成本更低的有时还能比连续控制方法给出更好性能的有效的控制方法. 在最近一些年, 脉冲控制引起了许多研究者的兴趣. 这类控制问题自然地出现在一个很广泛的应用领域, 例如人造卫星的轨道转移、生态系统管理、控制经济市场的货币供应量等.

时滞是自然界广泛存在的一种现象, 例如带式运输机中物料传输的延迟, 卫星通信中信号传递的延迟, 原水多级泵送系统中水流传输的延迟等, 都是典型的时滞现象. 因此, 研究具有时滞的脉冲系统是十分必要的.

作为一种典型的混合系统, 脉冲动力系统在理论和应用上具有重要意义. 其控制理论及在控制工程上的应用尚在发展之中. 本书较详细地

分析了脉冲系统的特点和国内外研究概况,较系统地研究了脉冲系统的定性性质及在控制上的应用.

本书的研究内容主要分以下六个方面:

(1) 研究了具有时滞的脉冲线性系统的稳定性. 首先我们利用分段连续的 Lyapunov 函数, 我们给出了具有时滞的脉冲线性系统稳定的一些新的充分条件; 其次, 我们考虑了在脉冲点状态变量与时滞有关的脉冲线性时滞微分系统, 通过利用分段连续的 Lyapunov 函数, 我们得到了该类系统稳定的一个结果, 应该注意到, 这是首次研究这类脉冲系统.

(2) 研究了脉冲泛函微分方程的稳定性. 首先研究了脉冲泛函微分方程的严格稳定性, 我们为脉冲泛函微分方程引入了严格稳定性的概念, 通过利用分段连续的 Lyapunov 函数和 Razumikhin 技巧, 我们给出了该类方程严格稳定的一些判据; 其次, 我们研究了在脉冲点状态变量与时滞有关的脉冲泛函微分方程的稳定性, 通过利用分段连续的 Lyapunov 函数和 Razumikhin 技巧, 我们分别给出了这类方程一致稳定、一致渐近稳定和实用稳定的一些充分条件.

(3) 研究了变时滞脉冲系统的定性性质. 首先研究了变时滞脉冲系统的解的有界性, 通过利用分段连续的 Lyapunov 函数和 Razumikhin 技巧, 我们给出了解的有界性的一些更为一般的判据. 应该注意到, 在我们研究的这类系统中, 时滞可能是无穷大的, 我们所得到的有界性判据推广了已有的结果; 其次, 我们研究了变时滞脉冲微分系统的稳定性, 通过利用 Lyapunov 泛函和 Razumikhin 技巧或是分段连续的 Lyapunov 函数和 Razumikhin 技巧, 我们给出了系统稳定性的更为一般的判据, 在利用 Razumikhin 技巧时, 我们用了由张书年给出的一个新的方法.

(4) 研究了在双测度下脉冲系统的定性性质. 首先研究了在双测度

下具有时滞的脉冲系统的稳定性,我们为具有时滞的脉冲微分系统引入一个新的稳定性概念——双测度下的最终实用稳定性,通过利用分段连续的 Lyapunov 函数和比较原理,我们给出了在双测度下具有时滞的脉冲系统最终实用稳定的一些判据;其次,我们研究了脉冲泛函离散系统在双测度下的有界性,利用 Lyapunov 函数和 Razumikhin 技巧,我们给出了该类系统在双测度下一致有界、最终有界的一些结果。

(5) 研究了几类系统的脉冲控制问题. 首先研究了具有时滞的二阶微分系统的脉冲控制,利用分段连续的 Lyapunov 函数,我们给出了在脉冲控制下具有时滞的二阶微分系统稳定的一些判据;其次,我们研究了具有时滞的离散系统的脉冲控制,我们为具有时滞的离散系统设计了一个脉冲控制器,通过利用 Lyapunov 函数和 Razumikhin 技巧,我们给出了在脉冲控制下具有时滞的离散系统一致稳定、一致渐近稳定的一些判据;最后,我们研究了一类 Hopfield 神经网络的脉冲控制,利用分段连续的 Lyapunov 函数,给出了在脉冲控制下该类系统一致稳定的一个结果。

(6) 研究了几类复杂脉冲系统的稳定性. 首先研究了变时滞脉冲线性混杂系统的稳定性,利用分段连续的 Lyapunov 函数,我们给出了变时滞脉冲线性混杂系统与时滞无关的稳定性的判据,我们也给出了例子来说明我们得到的稳定性判据可以研究已有的文献中所不能研究的一些情况;其次,利用 Lyapunov 泛函和线性矩阵不等式,我们给出了具有定常时滞的脉冲线性混杂系统的时滞依赖的稳定性判据,同时,我们也得到了具有不确定性和时滞的脉冲线性混杂系统鲁棒稳定性的判据. 再次,我们研究了具有脉冲影响的分段仿射/线性系统的稳定性,通过利用分段二次函数或是分段连续的 Lyapunov 函数,我们得到了分段仿射/线性系统稳定性的一些结果;最后,我们研究了脉冲联

结时滞微分连续时间差分系统的稳定性,我们将 L_2 稳定和 L_2 渐近稳定的概念引入到脉冲联结时滞微分连续时间差分系统,通过利用 Lyapunov 泛函,我们得到了该类系统 L_2 稳定、 L_2 渐近稳定的一些结果.

目 录

总序
论丛前言
前言

第 1 章	绪论	1
1.1	研究背景与进展	1
1.2	基本概念	8
1.2.1	脉冲微分系统的描述	9
1.2.2	固定脉冲时刻的系统	10
1.2.3	变化脉冲时刻的系统	12
1.2.4	脉冲自治系统	12
1.3	脉冲系统解的存在唯一性	13
1.3.1	解的局部存在性	13
1.3.2	解的全局存在性	15
1.3.3	解的唯一性	16
1.4	脉冲时滞系统解的存在唯一性	17
第 2 章	脉冲线性系统的研究	23
2.1	具有时滞的脉冲线性系统的稳定性	23
2.1.1	概述	23

2.1.2	预备知识	24
2.1.3	主要结果	25
2.2	在脉冲点状态变量与时滞有关的脉冲线性时滞微分系统的稳定性	31
2.2.1	概述	31
2.2.2	预备知识	31
2.2.3	主要结果	32
2.3	本章小结	39
第3章	脉冲泛函微分方程的稳定性分析	40
3.1	脉冲泛函微分方程的严格稳定性	40
3.1.1	研究背景	40
3.1.2	预备知识	41
3.1.3	主要结果	43
3.2	在脉冲点状态变量与时滞有关的脉冲泛函微分方程的稳定性	54
3.2.1	研究背景	54
3.2.2	预备知识	55
3.2.3	主要结果	57
3.3	本章小结	74
第4章	变时滞脉冲微分系统的研究	76
4.1	变时滞脉冲微分系统解的有界性	76
4.1.1	概述	76
4.1.2	预备知识	76
4.1.3	主要结果	77
4.2	变时滞脉冲微分系统解的稳定性	86
4.2.1	概述	86
4.2.2	预备知识	87

4.2.3 主要结果	89
4.3 本章小结	98
第5章 双测度下脉冲系统的研究	99
5.1 双测度下具有时滞的脉冲微分系统的最终实用稳定性	99
5.1.1 研究背景	99
5.1.2 预备知识	100
5.1.3 主要结果	102
5.2 脉冲泛函离散系统在双测度下的有界性	107
5.2.1 研究背景	107
5.2.2 预备知识	107
5.2.3 主要结果	108
5.3 本章小结	119
第6章 几类系统的脉冲控制	120
6.1 具有时滞的二阶微分系统的脉冲控制	120
6.1.1 概述	120
6.1.2 预备知识	121
6.1.3 主要结果	123
6.2 具有时滞的离散系统的脉冲控制	136
6.2.1 概述	136
6.2.2 预备知识	137
6.2.3 主要结果	138
6.3 具有时滞的神经网络的脉冲控制	146
6.3.1 概述	146
6.3.2 预备知识	146
6.3.3 主要结果	149
6.4 本章小结	154