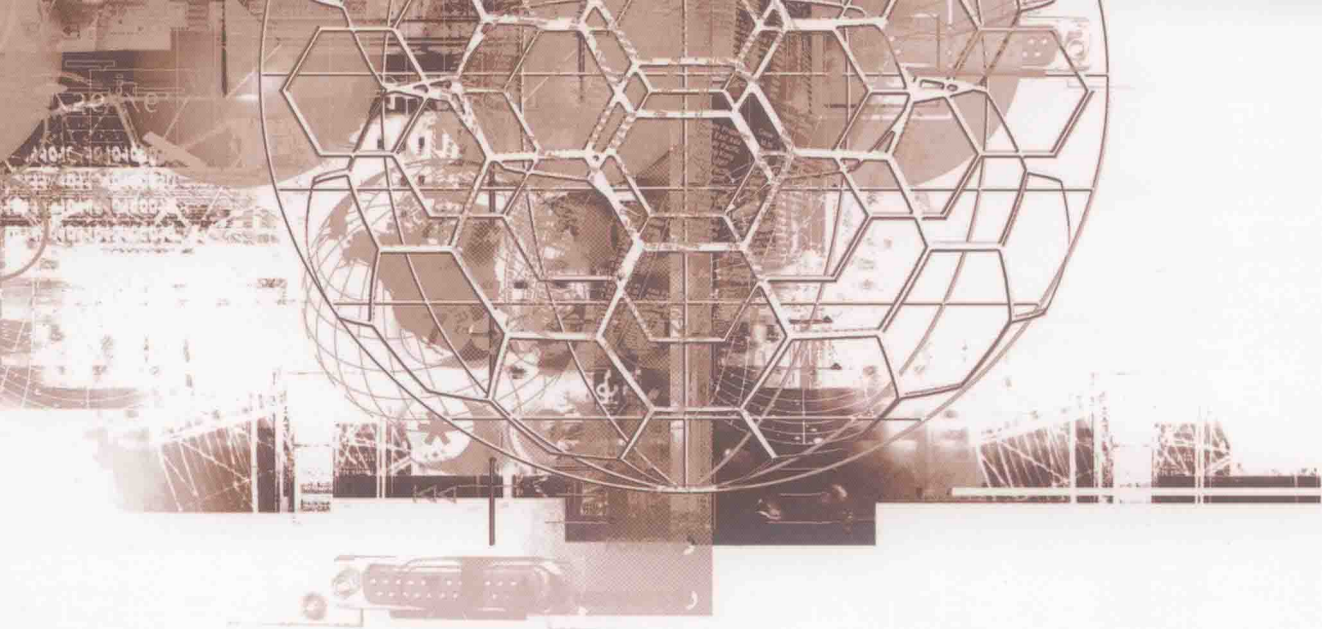




陈宗海 主编

**System
Simulation
Technology & Application**
(Vol. 19)

**系统仿真技术
及其应用**

· 第19卷 ·

中国科学技术大学出版社

系统仿真技术及其应用

· 第 19 卷 ·

陈宗海 主编



中国科学技术大学出版社

2018 · 合肥

内 容 简 介

本书为中国自动化学会系统仿真专业委员会联合中国仿真学会仿真技术应用专业委员会主办的“第 19 届中国系统仿真技术及其应用学术年会”会议论文集。

本书共收录论文 78 篇,反映了近年来系统仿真科学与技术在自然科学、社会科学各领域以及航空、航天、石油、化工、能源、国防、轻工等行业中应用的最新成果,以及建模与仿真学、复杂系统新领域等的最新进展。

本书可供科研、设计部门和厂矿企业中系统仿真科学和技术的研究和应用人员以及高等学校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

系统仿真技术及其应用. 第 19 卷/陈宗海主编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2018. 8
ISBN 978-7-312-04538-7

I. 系… II. 陈… III. 系统仿真—文集 IV. N945. 13-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 187969 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
<http://press.ustc.edu.cn>
<https://zgkxjstxcbs.tmall.com>
印刷 安徽国文彩印有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 880 mm×1230 mm 1/16
印张 25.5
字数 1040 千
版次 2018 年 8 月第 1 版
印次 2018 年 8 月第 1 次印刷
定价 220.00 元

编 委 会

顾 问 李伯虎

主 编 陈宗海

副主编 王正中

编 委 蔡远利 陈春林 陈建华 陈宗海 丛 爽

范文慧 胡 斌 黄元亮 贾连兴 金伟新

李 革 廖 瑛 毛 征 王正中 张陈斌

写在卷首

“建模与仿真技术同高性能计算一起,正成为继理论研究和实验研究之后,第三种认识改造客观世界的重要手段。”(李伯虎院士)随着计算机、通信、控制等方面高科技的不断发展,大数据、云计算、物联网、车联网等新技术不断涌现,人工智能、虚拟现实等技术获得突破性发展,第三次产业革命的大幕正逐渐拉开,“仿真”这个古老而又年轻的学科更加朝气蓬勃地散发着无限的青春活力。

信息社会化的进程,使得仿真科学与技术面对的是一个丰富多彩的客观世界。信息化和信息社会化,使人类处理的系统规模与复杂性日益增长,人类对系统的认识和研究逐步深化,可利用的信息资源的影响已具有全球化的性质,同时对知识性工作自动化的需求也逐渐迫切起来。这个信息社会化和知识自动化迅猛发展的背景,推动了系统仿真方法学的革新、发展与进步。

近年来,建模与仿真方法学致力于更自然地抽取事物的特征、属性和实现其更直观的映射描述,寻求使模型研究者更自然地参与仿真活动的方法。现阶段的任务主要是依托包括网络、多媒体等在内的计算机技术、通信技术等手段,通过友好的人机界面构造完整的计算机仿真系统,提供强有力的、具有丰富功能的软硬件营造的仿真环境,使开放复杂巨系统的模型研究,从单纯处理数学符号映射的计算机辅助仿真(CAS),到强化包括研究主体(人)在内的具有多维信息空间的映射与处理能力,逐步创建人、信息、计算机融合的智能化、集成化、协调化高度一体的仿真环境,构建信息和物理深度融合的系统(CPS)。可见,信息时代的到来正在孕育着系统仿真科学和技术某些新的突破。正待开发的系统仿真方法和仿真技术广阔无垠,需要我们从事系统仿真的科技工作者付出艰辛的劳动,使仿真这门迄今为止最有效、最经济的综合方法和推动技术进步的战略技术在现代化进程中发挥更大的促进作用。

人类社会已进入21世纪的第二个十年,随着云计算、大数据、高速无线通信等信息技术的兴起,信息革命正以“数据化”这一崭新和富有冲击性的形式影响人类生活的方方面面。随着数据获取成本的降低,数据采集精度、数据存储设备的性能和容量的提高,人类社会正在经历一个全面“数据化”的过程,现实的物理世界在数字化的“赛博空间”(Cyberspace)中的投影越来越清晰、越来越丰富,数据正在创造一个新的世界。继物理世界、人的精神世界之后,由计算机、通信、控制等数字化技术构建的“赛博空间”正在成为人类生活中不可或缺的一部分。数据不仅是企业的重要宝藏,也是赛博空间的氧气,离开了数据,人们在未来世界中将无法生存。在赛博空间中,人们不仅可以进行各种社交活动、游戏,也可以进行教育、科研、实验等各种具有创造性的社会活动,赛博空间不应该只有消耗,没有产出。这个世界和物理世界不是割裂的,它是现实世界的部分投影以及人类心灵世界的部分投影。同时,赛博空间也是物理空间与人类精神世界之间的桥梁。仿真科学与技术应该在这一股数据洪流席卷世界的大潮中扮演什么样的角色,是值得所有从事仿真科学工作的研究者共同思考和探讨的问题。

由中国自动化学会系统仿真专业委员会联合中国系统仿真学会仿真技术应用专业委员会主办的“第19届中国系统仿真技术及其应用学术年会”，共收到论文105篇，录用78篇。其中，大会特邀报告3篇，建模与仿真方法16篇，系统仿真14篇，航天与装备仿真14篇，控制与决策29篇。另有一个专题：大数据与云计算(2篇)。收录的论文涉及广泛的领域，内容丰富多彩，反映了当前学科发展的方向和技术应用的水平。这次学术交流，无疑将对我国系统仿真科学与技术的发展起到积极的推进作用。

编委会

2018年6月于中国科学技术大学

目 录

写在卷首	(i)
------------	-------

第一部分 大会特邀报告

终端滑模控制研究与发展现状	蔡远利,李慧洁(2)
基于非负矩阵分解的往复式压缩机故障数据聚类算法	孔晗暘,杨清宇,蔡远利,等(7)
Key Technologies in Lithium-ion Battery Management System of Electric Vehicles: Challenges and Recommendations	Wang Yujie,Chen Zonghai (13)

第二部分 建模与仿真方法

分数阶超混沌系统基于广义同步的混沌遮掩保密通信	马周健,王军(23)
一主多从遥操作协同分布式控制器设计与一致性仿真	宋娇娇,王军,刘斯怡(29)
地面共振试验仿真建模分析	赵冬强,杨佑绪,孙晓红(36)
基于 NetLogo 的作战系统动力学模型设计与实现	余昌仁,贾连兴,马兵(41)
数据驱动的分布式探测信号时间配准方法研究	时蓬,王斌(44)
基于 BOM 的航天测控仿真系统组合建模技术研究	黄钊,苗毅,王磊(50)
兰伯特问题解法数值仿真与性能分析	吴其昌,张洪波(56)
航天发射仿真中虚拟人运动控制的实现	苏永芝,张振伟,刘党辉(60)
基于大气红外透射率的实际距离估算	李艺辰,曲劲松,毛征,等(65)
量子定位中粗跟踪控制系统设计与仿真试验	汪海伦,丛爽,王大欣,等(68)
基于数值模型的遥感体系需求分析方法	彭靖,刘品雄,李薏,等(74)
基于 CN 与 HFLTS 的体系需求方案评估模型	金伟新(80)
复杂网络下信息扩散过程的系统动力学延迟分析	龚晓光(85)
面向控制的 PEMFC 降阶模型与仿真	李锡云,杨朵,汪玉洁,等(89)
基于 MATLAB/Simulink 微电网 HESS 的建模与仿真	王丽,杨晓宇,董广忠,等(94)
基于 Ptolemy II 的信息物理能源系统通信网络建模与仿真	徐瑞龙,董广忠,魏婧雯,等(100)

第三部分 系统仿真

航空高压直流电源系统仿真技术研究	杨乐,李丹,田玉斌(106)
面向虚拟试验的工程模拟器设计研究	崔坚,高颖(111)
基于虚拟现实/增强现实的复杂装备综合培训方法探讨	杨云斌,葛任伟,白永钢,等(116)
VR 全数字飞行程序训练系统设计	李育,李婷,李欣(121)
面向人员 KSA 能力的综合评价方法研究	张崇龙(126)
面向抗震救灾应用的航天任务系统设计与仿真	王斌,时蓬(130)
基于虚拟仪表的行驶状态显示系统开发	袁翠红,王绍奔,杨俊强,等(135)
基于数据耕种的体系作战运用仿真框架探析	蔺美青(139)
物联网环境下企业业务流并行分布式模拟系统	胡斌,刘洪波(144)
基于社会力模型的人群运动仿真模拟	朱前坤,南娜娜,惠晓丽,等(149)
基于 AMESim 的质子交换膜燃料电池系统仿真	潘瑞,杨朵,汪玉洁,等(154)
基于设计图的 Unity 3D 三维虚拟展馆实现	朱英浩(159)
天基系统支持联合作战仿真应用发展分析	王俐云,孙亚楠,许社村,等(163)
指挥信息系统体系结构建模与仿真研究平台设计	程安潮(167)

第四部分 航天与装备仿真

空间飞行器红外辐射特性建模与仿真计算	万自明,韩玉阁,杨帆,等(173)
民用飞机地面动响应载荷优化设计	卜沈平,童亚斌,张健(179)
多功能飞行目标仿真器软件设计与实现	赫赤,董光玲,李强,等(183)
摇臂式起落架缓冲性能设计技术研究	张雷,陈云,张国宁(188)
基于工程模拟器的大型飞机飞控系统试验技术	马力,朱江(192)
GEO 卫星小推力位置保持策略建模与仿真	龚轲杰,廖瑛,边明珠(196)
舰载机工程模拟器系统建模与仿真技术研究	朱江,林皓,姬云,等(202)
无人机综合仿真验证平台设计研究	马铭泽,李梓衡(207)
硬式加油的受油机运动模拟系统建模与仿真	陈伟,赵鹏(213)
卫星网络协议的数字化仿真技术研究	范媛媛,胡月梅,王大鹏,等(217)
UCAV Operational Effectiveness Assessment Based on Department of Defense Architecture Framework	Dong Yanfei, Xu Guanhua (222)
遥感卫星系统体系仿真与效能评估技术发展研究	李帅,任迪(228)
声尾流自导鱼雷命中区域仿真分析与应用	张江(232)
虚拟靶场战术导弹试验技术研究	韦宏强,郑屹,杨允海(237)

第五部分 控制与决策

绳系卫星系统子星姿态控制问题研究	王志达,张兵,林彦,等(242)
基于输出重定义的柔性机械臂复合控制	张琪,张磊,贺庆利(247)
量子定位中精跟踪系统的 PID 控制及其仿真试验	邹紫盛,丛爽,尚伟伟,等(252)
指挥所信息服务装备效能评估指标体系研究	侯银涛,熊焕宇,余昌仁,等(256)
大展弦比无人机的气动伺服弹性稳定性分析及控制	杨佑绪,赵冬强,马翔(261)
基于注意模型深度学习的文本情感倾向性研究	刘伟,陈春林(265)
V3 并联机器人的时间最优轨迹规划研究	张志豪,李秀文,廖斌,等(273)
具有量化输入的小型无人直升机控制	万敏,阎坤,瞿有杰,等(278)
燃料电池系统气体调压控制	杨朵,潘瑞,汪玉洁,等(283)
基于粒子滤波器的动力锂电池容量衰减在线评估	刘畅,汪玉洁,陈宗海(288)
空天态势推演与预测分析方法	尹江丽,郭效芝(293)
空间信息系统综合效能评估技术研究	秦大国,侯妍(297)
锂电池储能系统故障诊断综述	田佳强,汪玉洁,陈宗海(301)
质子交换膜燃料电池过氧比控制策略研究	孙震东,杨朵,汪玉洁,等(306)
一种拦截大机动目标的变结构中制导律	徐泽宇,蔡远利,李慧洁(311)
基于容积卡尔曼滤波的三维纯角度跟踪算法研究	姜浩楠,蔡远利(315)
基于下垂控制方法的孤岛直流微电网分布式储能系统的控制策略	孙韩,陈宗海(320)
无线纳米传感器网络路由协议设计	廖强,高坤(324)
基于 Grubbs 准则和 EKF 的锂电池组故障诊断策略	徐可,魏婧雯,董广忠,等(329)
考虑不确定性的基于粒子群优化的微电网能源管理	于晓玮,张陈斌,魏婧雯,等(337)
基于李雅普诺夫观测器开路电压估计的锂离子电池组均衡控制方法	魏婧雯,徐可,陈宗海(342)
基于边缘直线拟合的区域主方向识别方法	包鹏,陈宗海(347)
A Novel Line Segments Extraction Algorithm Based on DBSCAN Method	Wang Jikai, Chen Zonghai (352)
基于区间分析的 SLAM 方法及其性能研究	戴德云,王纪凯,陈宗海(357)
Object Proposal with Modified Edge Boxes Based on Visual Saliency	
.....	Zhao Hao, Wang Jikai, Chen Zonghai, et al (362)
Monte Carlo Localization Based on the Uniform Distribution	Foroughi Farzin, Chen Zonghai (368)
基于区域相似性的改进蒙特卡洛定位方法	张启彬,王纪凯,包鹏,等(374)
基于负载迁移的微电网需求侧管理优化策略	朱亚运,魏婧雯,董广忠,等(379)
具有内部互联特性的语义库模型建立及其在可疑人员识别中的应用	冯宇衡,蒋亦然,赵昀昇,等(385)

第六部分 大数据与云计算

基于 Hadoop 的交通大数据存储系统的研究..... 郭晶晶,梁英杰,严承华,等(390)

基于深度卷积神经网络的验证码识别 洪洋,葛振华,王纪凯,等(394)

第一部分

大会特邀报告

终端滑模控制研究与发展现状

蔡远利^{1,2}, 李慧洁¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西西安, 中国, 710049; 2. 厦门工学院, 福建厦门, 中国, 361021)

摘要:从终端滑模结构、滑模到达条件、奇异问题、抖振问题、非匹配不确定系统控制、输入受限系统控制和离散终端滑模控制等七个方面, 分析和总结了终端滑模控制理论近年的研究与发展。分析了终端滑模、快速终端滑模、非奇异终端滑模、双幂次型快速终端滑模、非奇异快速终端滑模、全局终端滑模、基于恒等变换的非奇异快速终端滑模及其他形式的终端滑模的特点和关键要素, 讨论了滑模到达条件中的趋近律、有限时间收敛特性和固定时间收敛特性。最后, 指出了终端滑模控制未来可能的几个研究与发展方向。

关键词:非奇异终端滑模; 趋近律; 抖振; 有限时间收敛; 固定时间收敛

中图分类号: TJ765.3

On the Research and Development of Terminal Sliding Mode Control

Cai Yuanli^{1,2}, Li Huijie¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Shaanxi, Xi'an, 710049;

2. Xiamen Institute of Technology, Fujian, Xiamen, 361021)

Abstract: This paper gives out a brief review on the application and development of terminal sliding mode (TSM) control theory. The terminal sliding mode surface structures, reaching conditions, singularity phenomenon, chattering problem, systems with unmatched uncertainties, systems with input constraints, and discrete terminal sliding mode control are discussed in details. TSM, fast TSM, nonsingular TSM, double-power fast TSM, nonsingular fast TSM, global TSM and other types are involved and analyzed. The main current results on the reaching laws, finite-time convergence, and fixed-time convergence for sliding mode reaching conditions are presented. Some possible research directions for TSM control are provided from the authors point of view.

Key words: Nonsingular TSM; Reaching Law; Chattering; Finite-time Convergence; Fixed-time Convergence

1 引言

滑模控制是变结构控制的一个重要分支, 是一类特殊的非线性控制, 对满足匹配条件的模型不确定性具有不变性, 在机器人、电力系统、飞行器制导与控制^[1-12]等多个领域得到了广泛应用。终端滑模控制是在滑模面中引入非线性函数, 使得系统状态在有限时间内收敛至平衡点。由于没有解决滑模控制固有的抖振问题, 非线性项的引入又带来了奇异问题, 因此终端滑模控制方法成为目前滑模控

制理论研究的热点。

2 终端滑模研究进展

传统的线性滑模是系统状态的线性组合, 通过参数调整可满足控制系统的设计要求, 系统稳定性分析比较简单, 但收敛至平衡点的时间理论上趋于无穷。

2.1 终端滑模

Zak^[13]首次提出了终端吸引子的概念。Venkataraman等^[14]发展了终端滑模控制方法, 并给出了系统存在不确定性时的稳态误差界。Man等^[15]将终端滑模控制方法推广到二阶 MIMO 系统, 并推导出了收敛时间表达式。Yu等^[16]提出了递阶终端滑模控制方法。

终端滑模引入了非线性项, 加快了平衡点附近状态的收敛速度, 但同时也降低了远离平衡点时的收敛速度。

作者简介:蔡远利(1963—), 男, 贵州瓮安人, 教授、博士生导师, 研究方向为现代控制理论及应用、复杂系统建模与仿真、飞行器制导与控制、飞行动力学等; 李慧洁(1990—), 男, 浙江温州人, 博士研究生, 研究方向为滑模控制、协同控制、飞行器制导与控制系统设计等。

基金项目:国家自然科学基金(61202128, 61463029)和宇航动力学国家重点实验室开放基金(2011ADL-JD0202)。

2.2 快速终端滑模

Man 等^[17]在 MIMO 线性系统中首次在线性滑模中加入了非线性项。Yu 等^[18]在终端滑模面中引入了线性项,加快了滑模运动阶段系统状态远离平衡点时的收敛速度,并给出了收敛时间表达式。

快速终端滑模保证了系统状态在平衡点附近时的收敛速度,同时改善了远离平衡点时收敛缓慢的问题。

终端滑模和快速终端滑模都包含状态负幂次项,但仍可能发生控制奇异。

2.3 非奇异终端滑模

Feng 等^[3,19]提出了一种直接避免奇异的非线性滑模,即非奇异终端滑模,并推广到线性 MIMO 系统。穆朝絮等^[20]研究了二阶系统的非奇异终端滑模控制,并给出了收敛时间的估计。

非奇异终端滑模控制系统的收敛时间表达式与终端滑模相同,同样牺牲了状态远离平衡点时的控制性能。

2.4 双幂次型快速终端滑模

Yu 等^[21]提出了一种双分数幂次型终端滑模,整个滑模运动阶段都具有较快的收敛速度。Yang 等^[22]针对双分数幂次引起的复数问题提出了双实数幂次型终端滑模,并给出了基于高斯超几何函数的收敛时间表达式。蒲明等^[23]推导了双幂次具有特殊关系时的收敛时间表达式。

与传统的线性滑模相比,双幂次型快速终端滑模的控制整体提高了系统状态的收敛速度,但仍可能发生控制奇异。

2.5 非奇异快速终端滑模

李升波等^[24]针对奇异和非奇异终端滑模控制收敛缓慢的问题,提出了一种非奇异快速终端滑模,并推导出了基于高斯超几何函数的收敛时间表达式,证明了非奇异快速终端模块的收敛速度要快于非奇异终端滑模的收敛速度。此外,控制量中不包含负幂次项,避免了奇异现象。

2.6 全局终端滑模

Park 等^[25]在线性滑模中引入了特殊的辅助函数,构造了一种新的适用于二阶系统的终端滑模,且无奇异现象,收敛时间可任意指定,同时消除了滑模到达阶段。庄开宇等^[26]针对一类高阶非线性系统,设计了一种基于高次幂多项式的全局终端滑模控制策略,克服了 Park 等滑模面导数不连续的缺点。Liu 等^[27]结合全局终端滑模和动态滑模,通过直接设计控制量的导数来削弱抖振,并保证了有限时间收敛特性。我们基于全局终端滑模设计了一种高阶滑模控制器^[28]。郭益深等^[29]针对一类 MIMO 非线性系统,提出了一种形式较为简单的全局终端滑模。

全局终端滑模本质上是一种时变滑模,需要精确的状

态初始信息,且要保证系统状态全程处于滑模面上。

2.7 基于恒等变换的非奇异终端滑模

Yu 等^[30]提出了一种避开奇异的终端滑模和快速终端滑模及其递归形式。Li 等^[31]在此基础上引入了辅助函数,改进了滑模控制策略。我们基于固定时间理论和双幂次型快速终端滑模,提出了一种避开奇异的快速终端滑模,给出了收敛时间上界的估计。这种非奇异终端滑模具有与双幂次型快速终端滑模相同的收敛速度,且收敛时间不依赖于系统状态初值的上界^[32]。Zuo^[33]基于双幂次型终端滑模构造了另一种形式的避免奇异的终端滑模。

2.8 其他形式的终端滑模

Yu 等^[34]针对分数幂次引起的复数问题,提出了终端滑模、快速终端滑模、非奇异终端滑模对应的实数幂次型。Hong 等^[35]针对一类高阶非线性系统,设计了区别于标准形式的终端滑模。康宇等^[36]提出了一种指数型快速终端滑模,其收敛速度优于快速终端滑模,但仍存在奇异问题。张秀华等^[37]提出了一种对数型快速终端滑模。胡庆雷等^[38]提出了一种指数形式的非奇异快速终端滑模,在提升收敛速度的同时还避免了奇异问题。赵霞等^[39]基于多模态滑模概念设计了一种由线性滑模和非奇异终端滑模组合而成的非奇异快速终端滑模。马悦悦等^[40]设计了一种基于终端滑模和非奇异终端滑模的复合滑模,并采用分阶段控制提高了收敛速度。李高鹏等^[41]根据终端滑模控制机理构造了终端函数准则。Jo 等^[42]分析了终端滑模的一般化设计。蒲明等^[28]分析了终端滑模产生奇异的原因,并基于李代数的非奇异判据,给出了两种新型非奇异快速终端滑模及其收敛时间表达式。Chiu^[43]针对相对阶为 1 的系统,设计了微分型和积分型终端滑模,并通过递归形式推广到高相对阶系统。Cruz-Zavala 等^[44]避开了传统滑模控制的两步设计方法,通过 Lyapunov 函数直接求解终端滑模控制律。Feng 等^[45]针对高阶积分链系统,设计了一种基于有限时间理论的终端滑模面,并通过直接对控制量的导数设计控制律来削弱抖振。

3 滑模到达条件研究进展

Utkin^[46]最先讨论了滑模存在的充分条件,此后 Slotine 等提出了滑模到达条件,并指出了系统状态到滑模面的平方“距离”沿所有系统轨线减少。

3.1 滑模趋近律

滑模趋近律决定了滑模到达阶段的品质。高为炳院士分析了等速趋近律、指数趋近律、幂次趋近律等典型趋近律^[47]; Yu 等^[34]提出了快速幂次趋近律;梅红等^[48]提出了双幂次趋近律;张瑶等^[49]提出了多幂次趋近律。

滑模到达条件要求系统状态等速趋近滑模面,指数趋近律加快了远离滑模面时的趋近速度。幂次趋近律、双幂次趋近律和多幂次趋近律本质上都是连续的,虽消除了抖

振,但在受扰时仍存在稳态误差。快速幂次趋近律改善了幂次趋近律在远离滑模面时趋近速度过小的缺点,双幂次趋近律和多幂次趋近律具有全局快速收敛特性。

在终端滑模控制中,结合终端滑模和趋近律,能够整体提升趋近运动和滑模运动的品质。Tang^[50]将终端滑模和指数趋近律结合并应用到多级机械臂控制中;张巍巍等^[51]提出了一种基于指数趋近律和伪指数趋近律的非奇异终端滑模控制的设计方法,此方法在克服奇异问题的基础上,提高了收敛速度;许波等^[52]提出了一种自适应变速指数趋近律。

3.2 有限时间收敛

幂次趋近律、快速幂次趋近律、双幂次趋近律和多幂次趋近律都具有有限时间收敛特性。Bhat等^[53]建立了有限时间收敛的判定定理。

3.3 固定时间收敛

双幂次趋近律和多幂次趋近律都具有固定时间收敛特性,Polyakov等^[54]给出了固定时间收敛的判定定理,我们论证了双幂次型快速终端滑模也具有固定时间收敛特性^[55]。

4 奇异问题

终端滑模控制中的奇异问题是由终端滑模的非线性项引起的,目前的解决方案主要有直接法和间接法两种。间接法主要是指Wu等^[56]提出的两阶段控制方法,即首先采用其他控制方法迫使系统状态到达非奇异区域,然后切换为终端滑模控制。Feng等^[57]在二阶系统终端滑模控制中引入控制饱和和门限,改善了控制奇异现象。直接法是指构造本质上非奇异的终端滑模结构,目前主要有非奇异终端滑模、非奇异快速终端滑模及其各种改进型。

5 抖振问题

传统的滑模控制方法存在固有的抖振问题,终端滑模控制方法亦如此。消除抖振方法有饱和函数、Sigmoid函数、双曲正切函数等连续化近似方法,神经网络、干扰观测器等不确定性估计补偿方法,以及动态滑模和滑动扇区法^[58]。此外,双幂次趋近律等本质上连续的趋近律也能够消除抖振,并改善趋近运动的品质。

6 非匹配不确定系统的终端滑模控制

非匹配不确定系统是终端滑模控制研究的一个重点。鲍晨等^[59,60]针对一类非匹配不确定MIMO线性系统,设计了特殊的终端滑模面及相应控制策略,使系统状态在有限时间内收敛到平衡点附近邻域内。郑剑飞等^[61]针对一类参数严格反馈型的非匹配不确定非线性系统,提出了一种自适应反演终端滑模控制方法。李浩等^[62]在此基础上引入了非奇异快速终端滑模。蒲明等^[63]采用改进的高阶滑模微分器作为干扰观测器估计非匹配干扰,并设计了非

奇异递阶终端滑模控制器。Yang等^[64]采用有限时间观测器估计不匹配干扰,并在非奇异终端滑模控制中加以补偿。

7 输入受限系统的终端滑模控制

李静等^[65]针对吸气式高超声速飞行器,引入了反正切函数防止控制饱和。Ding等^[66]通过改进非奇异终端滑模,处理二阶系统的输入受限问题。Hu等^[67]设计了基于反正切函数的有限时间快速终端滑模控制律。

8 离散终端滑模控制

Janardhanan等^[68]分析了终端滑模的离散化问题,并指出离散化后易失去有限时间收敛性。Abidi等^[69]结合线性滑模和终端滑模,提出了一种离散终端滑模控制方法。Li等^[70]分析了终端滑模欧拉离散化后的动态性能。Du等^[71]分析了离散快速终端滑模的动态性能。

9 结论与展望

终端滑模控制方法具有优良的收敛特性和鲁棒性,在快速收敛特性方面已经取得了丰富的理论成果,但在控制奇异、抖振、不匹配干扰、控制输入受限、时间离散化等方面的研究尚不充分。

终端滑模在未来一段时间内仍然是控制理论与控制工程学科重要的前沿领域,一些可能的研究和发展方向包括:①借助固定时间收敛理论,研究可能的固定时间非奇异终端滑模;②进一步研究趋近律特性,分析稳态误差界,结合观测器、自适应、神经网络、模糊控制等方法,设计弱抖振、强鲁棒性的滑模控制策略;③通过构造合适的辅助函数来消除奇异,保证闭环系统的快速收敛特性;④借助任意阶精确鲁棒微分器等手段,研究直接设计终端滑模控制器的方法;⑤深入研究控制受限有限时间/固定时间滑模控制的设计和分析方法;⑥发展和完善离散时间终端滑模控制的理论和方法。

参考文献

- [1] Slotine J J, Sastry S S. Tracking control of non-linear systems using sliding surfaces with application to robot manipulators [J]. International Journal of Control, 1983, 38 (2): 465-492.
- [2] Utkin V, Guldner J, Shijun M. Sliding Mode Control in Electromechanical Systems [M]. Taylor & Francis, 1999.
- [3] Feng Y, Yu X H, Man Z H. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators [J]. Automatica, 2002, 38(12): 2159-2167.
- [4] Huerta H, Loukianov A G, Canedo J M. Multimachine power-system control: Integral-SM approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56 (6): 2229-2236.
- [5] 蒲明, 吴庆宪, 姜长生, 等. 基于二阶动态 Terminal 滑模的近空间飞行器控制[J]. 宇航学报, 2010, 31(4): 1056-1062.
- [6] 支强, 蔡远利. 基于非线性干扰观测器的 KKV 气动力/直接

- 力复合控制器设计[J]. 控制与决策, 2012, 27(4): 579-583.
- [7] 高海燕, 蔡远利. 高超声速飞行器的滑模预测控制方法[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(1): 67-72.
- [8] Gao J W, Cai Y L. Fixed-time control for spacecraft attitude tracking based on quaternion [J]. Acta Astronautica, 2015, 115: 303-313.
- [9] 高海燕, 蔡远利, 唐伟强. 基于 LMI 的高超声速飞行器滑模预测控制[J]. 飞行力学, 2016, 34(5): 49-53.
- [10] Gao J W, Cai Y L. Adaptive finite-time control for attitude tracking of rigid spacecraft [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2016, 29(4): 04016016.
- [11] Gao J W, Cai Y L. Robust adaptive finite time control for spacecraft global attitude tracking maneuvers [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2016, 230(6): 1027-1043.
- [12] 胡翌玮, 蔡远利. 主动防御的滑模制导算法研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2018, 359(1): 63-68.
- [13] Zak M. Terminal attractors for addressable memory in neural network [J]. Physics Letters A, 1988, 133(1/2): 18-22.
- [14] Venkataraman S T, Gulati S. Terminal sliding modes: A new approach to nonlinear control synthesis [C]//91 ICAR, Fifth International Conference on Advanced Robotics, Robots in Unstructured Environments, 1991: 443-448.
- [15] Man Z, Paplinski A P, Wu H R. A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(12): 2464-2469.
- [16] Yu X H, Man Z H. Model reference adaptive control systems with terminal sliding modes [J]. International Journal of Control, 1996, 64(6): 1165-1176.
- [17] Man Z, Xing H Y. Terminal sliding mode control of MIMO linear systems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1997, 44(11): 1065-1070.
- [18] Yu X H, Man Z H. Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2002, 49(2): 261-264.
- [19] Feng Y, Han X, Wang Y, et al. Second-order terminal sliding mode control of uncertain multivariable systems [J]. International Journal of Control, 2007, 80(6): 856-862.
- [20] 穆朝絮, 余星火, 孙长银. 非奇异终端滑模控制系统相轨迹和暂态分析[J]. 自动化学报, 2013, 39(6): 902-908.
- [21] Yu X H, Man Z, Wu Y Q. Terminal sliding modes with fast transient performance [C]//Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control, 1997: 962-963.
- [22] Yang L, Yang J Y. Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2011, 21(16): 1865-1879.
- [23] 蒲明, 吴庆宪, 姜长生, 等. 新型快速 Terminal 滑模及其在近空间飞行器上的应用[J]. 航空学报, 2011, 32(7): 1283-1291.
- [24] 李升波, 李克强, 王建强, 等. 非奇异快速的终端滑模控制方法及其跟车控制应用[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(5): 543-550.
- [25] Park K B, Tsuji T. Terminal sliding mode-control of second-order nonlinear uncertain systems [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 1999, 9(11): 769-780.
- [26] 庄开宇, 张克勤, 苏宏业, 等. 高阶非线性系统的 Terminal 滑模控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(5): 482-485; 539.
- [27] Liu J K, Fuchun S. A novel dynamic terminal sliding mode control of uncertain nonlinear systems [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2007, 5(2): 189-193.
- [28] Tang W Q, Cai Y L. High-order sliding mode control design based on adaptive terminal sliding mode [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2013, 23(2): 149-166.
- [29] 郭益深, 孙富春. 一类具有参数不确定 n 阶多输入多输出非线性系统的 Terminal 滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(3): 324-329.
- [30] Yu S, Du J, Yu X, et al. A novel recursive terminal sliding mode with finite-time convergence [C]. Proceedings of the 17th World Congress, the International Federation of Automatic Control, 2008: 5945-5949.
- [31] Li H, Dou L, Su Z. Adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control for electromechanical actuator [J]. International Journal of Systems Science, 2011, 44(3): 401-415.
- [32] Li H J, Cai Y L. On SFTSM control with fixed-time convergence [J]. IET Control Theory and Applications, 2017, 11(6): 766-773.
- [33] Zuo Z. Non-singular fixed-time terminal sliding mode control of non-linear systems [J]. IET Control Theory and Applications, 2015, 9(4): 545-552.
- [34] Yu S H, Yu X H, Shirinzadeh B, et al. Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode [J]. Automatica, 2005, 41(11): 1957-1964.
- [35] Hong Y G, Yang G W, Cheng D Z, et al. A new approach to terminal sliding mode control design [J]. Asian Journal of Control, 2005, 7(2): 177-181.
- [36] 康宇, 奚宏生, 季海波. 有限时间快速收敛滑模变结构控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(4): 623-626.
- [37] 张秀华, 徐炳林, 赵宇. 有限时间收敛的 Terminal 滑模控制设计[J]. 控制工程, 2008, 15(6): 637-639.
- [38] 胡庆雷, 姜博严, 石忠. 基于新型终端滑模的航天器执行器故障容错姿态控制[J]. 航空学报, 2014, 35(1): 249-258.
- [39] 赵霞, 姜玉宪, 吴云洁, 等. 基于多模态滑模的快速非奇异终端滑模控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(1): 110-113.
- [40] 马悦悦, 唐胜景, 郭杰. 基于 ESO 的复合滑模面非奇异 Terminal 滑模控制[J]. 控制与决策, 2015, 30(1): 76-80.
- [41] 李高鹏, 雷军委, 马颖亮. 全局一致终端滑模控制[J]. 上海航天, 2008, 25(1): 36-38.
- [42] Jo Y H, Lee Y H, Park K B. Design of generalized terminal sliding mode control for second-order systems [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2011, 9(3): 606-610.
- [43] Chiu C S. Derivative and integral terminal sliding mode control for a class of MIMO nonlinear systems [J].

- Automatica, 2012, 48(2): 316-326.
- [44] Cruz-Zavala E, Moreno J A, Fridman L. Fast second-order sliding mode control design based on Lyapunov function [C]//2013 IEEE 52nd Annual Conference on Decision and Control (CDC), 2013: 2858-2863.
- [45] Feng Y, Han F, Yu X. Chattering free full-order sliding-mode control [J]. Automatica, 2014, 50(4): 1310-1314.
- [46] Utkin V I. Variable structure systems with sliding modes [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1977, 22(2): 212-222.
- [47] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [48] 梅红, 王勇. 快速收敛的机器人滑模变结构控制[J]. 信息与控制, 2009, 38(5): 552-557.
- [49] 张瑶, 马广富, 郭延宁, 等. 一种多幂次滑模趋近律设计与分析[J]. 自动化学报, 2016, 42(3): 466-472.
- [50] Tang Y. Terminal sliding mode control for rigid robots [J]. Automatica, 1998, 34(1): 51-56.
- [51] 张巍巍, 王京. 基于指数趋近律的非奇异 Terminal 滑模控制[J]. 控制与决策, 2012, 27(6): 909-913.
- [52] 许波, 朱焜秋. 自适应非奇异终端滑模控制及其在 BPMSM 中的应用[J]. 控制与决策, 2014, 29(5): 833-837.
- [53] Bhat S P, Bernstein D S. Finite-time stability of continuous autonomous systems [J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2000, 38(3): 751-766.
- [54] Polyakov A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(8): 2106-2110.
- [55] 李慧洁, 蔡远利. 基于双幂次趋近律的滑模控制方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(3): 498-502.
- [56] Wu Y Q, Yu X H, Man Z H. Terminal sliding mode control design for uncertain dynamic systems [J]. Systems & Control Letters, 1998, 34(5): 281-287.
- [57] Feng Y, Yu X, Han F. On nonsingular terminal sliding-mode control of nonlinear systems [J]. Automatica, 2013, 49(6): 1715-1722.
- [58] Xu J X, Lee T H, Wang M, et al. Design of variable structure controllers with continuous switching control [J]. International Journal of Control, 1996, 65(3): 409-431.
- [59] 鲍晟, 冯勇, 郑雪梅. 非匹配不确定 MIMO 线性系统的终端滑模控制[J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 531-534; 539.
- [60] 郑雪梅, 冯勇, 鲍晟. 非匹配不确定系统的终端滑模分解控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(4): 617-622.
- [61] 郑剑飞, 冯勇, 郑雪梅, 等. 不确定非线性系统的自适应反演终端滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(4): 410-414.
- [62] 李浩, 窦丽华, 苏中. 非匹配不确定系统的自适应反步非奇异快速终端滑模控制[J]. 控制与决策, 2012, 27(10): 1584-1587; 1592.
- [63] 蒲明, 吴庆宪, 姜长生, 等. 非匹配不确定高阶非线性系统逆阶 Terminal 滑模控制[J]. 自动化学报, 2012, 38(11): 1777-1793.
- [64] Yang J, Li S H, Su J Y, et al. Continuous nonsingular terminal sliding mode control for systems with mismatched disturbances [J]. Automatica, 2013, 49(7): 2287-2291.
- [65] 李静, 左斌, 段冰毅, 等. 输入受限的吸气式高超声速飞行器自适应 Terminal 滑模控制[J]. 航空学报, 2012, 33(2): 220-233.
- [66] Ding S H, Zheng W X. New design method of sliding mode controller for a class of nonlinear second-order systems [C]//2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2014: 2784-2787.
- [67] Hu Q, Tan X, Akella M R. Finite-time fault-tolerant spacecraft attitude control with torque saturation [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2017, 40(10): 2524-2537.
- [68] Janardhanan S, Bandyopadhyay B. On discretization of continuous-time terminal sliding mode [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(9): 1532-1536.
- [69] Abidi K, Xu J X, She J H. A discrete-time terminal sliding-mode control approach applied to a motion control problem [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(9): 3619-3627.
- [70] Li S, Du H, Yu X. Discrete-time terminal sliding mode control systems based on euler's discretization [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(2): 546-552.
- [71] Du H, Yu X, Li S. Dynamical behaviors of discrete-time fast terminal sliding mode control systems [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2015: 77-97.

基于非负矩阵分解的往复式压缩机故障数据聚类算法

孔晗旻¹, 杨清宇^{1,2}, 蔡远利¹, 乃永强¹, 张志强¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西西安, 中国, 710049; 2. 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西西安, 中国, 710049)

摘要: 往复式压缩机结构复杂, 呈现出强耦合的非线性特征, 且其工作环境恶劣, 故障诱因较多。本文提出了一种基于非负矩阵分解的往复式压缩机故障数据聚类算法, 首先利用平方 Euclidean 距离的概念建立了误差矩阵 E 的代价函数, 其次利用三种不同的非负矩阵分解算法对代价函数进行求解, 最后根据分解后的基矩阵和系数矩阵确定数据所属的分类。在往复式压缩机故障数据集上的测试结果表明, 与其他聚类算法相比, 该方法可对不同类型的故障进行准确分类, 具有良好的应用前景和实用价值。

关键词: 非负矩阵分解; 聚类; 故障诊断; 往复式压缩机

中图分类号: TP181

Clustering Algorithm for Reciprocating Compressor Fault Data Based on Non-negative Matrix Factorization

Kong Hanyang¹, Yang Qingyu^{1,2}, Cai Yuanli¹, Nai Yongqiang¹, Zhang Zhiqiang¹

(1. School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiao tong University, Shaanxi, Xi'an, 710049;

2. SKLMSE Lab, Xi'an Jiao tong University, Shaanxi, Xi'an, 710049)

Abstract: The structure of reciprocating compressor is complex, which is a strongly coupled nonlinear system. The working conditions of reciprocating compressor are harsh. It has lots of fault inducement. In this paper, we propose a method of clustering the fault data of reciprocating compressor based on non-negative matrix decomposition. First, we establish the cost function of the error matrix E by using the concept of square Euclidean distance. Then we solve the cost function in three different non-negative matrix decomposition algorithms and determine the classification of data based on the decomposed basis matrix and coefficient matrix. The test result on the reciprocating compressor fault data set shows that, compared with other clustering algorithms, the method can classify different types of faults accurately, which has good application prospect and practical value.

Key words: Non-negative Matrix Decomposition; Clustering; Fault Diagnosis; Reciprocating Compressor

1 引言

往复式机械是利用曲轴连杆机构将曲轴旋转运动转换为活塞往复运动, 或将活塞往复运动转换为曲轴旋转运动的一类机械设备的总称, 在工业生产和日常生活中应用非常广泛。由于往复式压缩机的结构复杂、激励元众多, 是一个非线性、强耦合的系统, 且其工作环境非常恶劣, 容易发生故障, 对工业生产造成重大影响, 因此有必要对其进行及时的故障诊断^[1]。

故障诊断从本质上讲是解决故障数据的分类/聚类问

题, 聚类作为一种数据挖掘的重要方法, 在故障诊断领域有着非常广泛的应用。文献[2]提出了一种基于 K-means 聚类的压缩机连杆机构的故障诊断算法, 该方法明显提高了算法的收敛速度, 但是该算法在求解某些问题时仍然会陷入局部最优; 文献[3]提出了一种基于欧氏加权距离核的谱聚类方法, 采用聚类样本之间的欧氏加权距离测度进行相似性度量, 创建相似度矩阵, 并对样本数据进行聚类, 但相比于其他无监督聚类算法, 由于该算法需要计算相似度矩阵, 所以计算复杂度较高。

针对以上问题, 本文提出了一种基于非负矩阵分解的往复式压缩机故障聚类方法。首先利用平方欧氏距离的概念建立了误差矩阵 E 的代价函数, 然后利用三种不同的非负矩阵分解算法对代价函数进行求解, 最后根据分解

作者简介: 杨清宇(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为故障诊断与容错控制、智能电网信息安全、智能控制技术等。