

“十二五”国家重点图书出版规划项目

工程博弈论基础 及电力系统应用

梅生伟 刘锋 魏韡◎著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

工程博弈论基础 及电力系统应用

梅生伟 刘 锋 魏 韡 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍现代工程博弈基本理论及其在电力系统控制与决策领域的应用,内容分为三部分,第一部分为基础篇(第2章~第7章),主要从工程系统控制与决策角度阐述一般博弈论的基本概念及基本方法,包括静态非合作博弈、一般动态博弈、静态合作博弈、微分博弈及演化博弈等内容;第二部分为方法篇(第8章~第11章),主要介绍工程博弈论的4类先进设计方法,涉及多目标优化、鲁棒优化、鲁棒控制和多层优化4个领域;第三部分为应用篇(第12章~第17章),重点介绍工程博弈论在电力系统中的应用实例,主要涉及电力系统规划、调度、控制、电力经济、电网安全及电网演化等内容。

本书可作为电气工程、自动控制和系统工程专业的研究生教材,也可供从事上述专业的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程博弈论基础及电力系统应用/梅生伟,刘锋,魏犇著. —北京:科学出版社,2016.9

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-050010-6

I. ①工… II. ①梅… ②刘… ③魏… III. ①博弈论-控制与决策-电力系统 IV. ①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第230742号

责任编辑:周 炜/责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩/封面设计:左 讯

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年9月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年9月第一次印刷 印张:35

字数:703 000

定价:180.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

博弈论也称为对策论,是现代数学的一个分支,主要研究当多个决策主体之间存在利益关联或冲突时,各决策主体如何根据自身能力及所掌握的信息,做出利己决策的一种理论.进一步,还可认为博弈论是一门有关策略相互作用的理论,即每个决策主体选择行动时,都必须考虑其他决策主体如何行动及这种行动将对己方利益产生何种影响.博弈论从其诞生至今半个多世纪以来,已对经济学、社会学、军事学、政治学及工程科学等诸多领域产生了深远影响,成为控制与决策领域不可或缺的分析 and 辅助设计工具.目前博弈论在各学科领域硕果累累,据笔者所知,已有“政治博弈论”、“军事博弈论”、“社会博弈论”等,似独缺“工程博弈论”.该书能否担当“填补空白”之大任尚有待读者评说,但该书作者立足于电力系统控制与决策问题,梳理和总结工程博弈方法论并将之用于解决电力系统工程实际问题,勇气可嘉,雄心可勉.

随着现代电力系统理论和技术的不断发展,传统的互联电网在结构、运行、调度和控制等诸多方面均发生了重大变化.例如,在发电侧,出现了大型风电场、集中式光伏电站等可再生能源电站,极大增加了电源出力的控制难度;在配电侧,出现了分布式发电、储能设备和微电网等新型供电模式,它们在提升电网运行灵活性的同时,也增加了调度复杂度;在用户侧,随着电动汽车、智能家居及楼宇的日益普及,使负荷更具主动性.综合上述发电、配电及用户三个方面,易见主导现代电力系统运营的决策主体日趋多元化.另外,无论是现在还是将来,电力系统运营的最高境界永远是安全、经济、优质等多指标自趋优运行,而不可否认的是,上述目标之间往往具有竞争性乃至冲突性.此种情况下,电力系统多指标自趋优问题可归结为一类复杂系统多主体、多目标的优化决策问题.显而易见,传统的以单主体决策为主要特征的优化方法难以解决该类优化问题,而能够考虑多决策主体相互作用、多目标协调平衡的博弈理论无疑有望成为攻克上述电力系统优化决策难题的有力工具.

该书包括博弈基础理论、博弈优化方法和电力系统工程应用三个部分.第一部分涵盖非合作博弈、合作博弈和演化博弈这三项基本博弈理论,叙述简洁明快、内容完备丰富.第二部分主要论述复杂系统控制与决策的四种典型博弈优化方法,涉及多目标优化、鲁棒优化、鲁棒控制及双层优化等课题.第三部分是上述第二部分理论成果应用于实际电力系统的推演实例,包括电力系统控制、调度、规划、演化及若干电力经济问题.

该书不仅是一本良好的博弈论基础读物,而且有助于读者了解博弈论前沿学术动态,更在博弈论和电力系统控制与决策之间搭建了一座桥梁.相信该书会为有志于将博弈论应用于工程技术领域的读者提供有价值的参考.

该书的三位作者均是我的学生(过去的和现在的),他们从事工程博弈论研究的起点来自于基于微分博弈的电力系统非线性鲁棒控制,应该说正是此项研究激发他们勤奋工作、勇于创新,该书即是他们探索工程博弈论新方向的一个创试.希望他们继续努力,百尺竿头更进一步,以促进我国电力系统学术水平和运营效率的提高.

A handwritten signature in black ink, consisting of the Chinese characters '唐勇' (Tang Yong) written in a cursive style.

2015年4月于清华园

前 言

博弈论也称为对策论,它既是现代数学的一个分支,也是运筹学的重要组成部分.博弈论是以数学为工具,定量研究竞争与合作并存环境中优化问题的学科.

一般来讲,博弈论主要包括合作博弈、非合作博弈及演化博弈三个分支,其中合作博弈理论为 von Neumann 所创立,1944 年他与 Morgenstern 出版了名著《博弈论与经济行为》,正式奠定了现代博弈论的数学基础.非合作博弈则以 Nash 的工作为代表,他证明了非合作博弈解,即 Nash 均衡的存在性,从而奠定了现代非合作博弈的理论基础,可以说自 20 世纪 50 年代以来,非合作博弈已成为博弈论研究的主线.至于演化博弈,一般公认为是 Maynard Smith 在 1973 年正式创立,该理论可视为一般博弈理论与动态演化过程的有机结合,其中前者在有限理性而非完全理性的框架内研究博弈问题,后者则借鉴生物学中的生物演化理论 (Darwin 的自然选择学说).简言之,演化博弈中的决策主体 (参与者) 在有限知识、信息及推理能力条件下,根据环境变迁和其他决策主体的策略不断调整己方策略,以适应博弈环境.一般而言,博弈论是研究当多个决策主体之间的行为具有相互作用时,各决策主体如何根据所掌握的信息及对自身能力的认知,选择有利于己之决策的一种优化理论.换言之,博弈论是有关策略相互作用的理论,每个决策主体行动时都必须考虑其他决策者的行动.

博弈论从诞生至今的半个多世纪里,已经对经济学乃至整个社会科学产生了重要影响,成为一个重要的决策分析工具.时至今日,博弈论不仅已成为微观经济学的基础和主流经济学的主要组成部分,更有学者认为它是整个社会科学的基础.可以毫不夸张地讲,博弈论是人类深刻理解和探索经济行为及社会问题的基本工具之一,过去 40 余年来,更成为政治、军事、工程、信息、生物乃至管理学等诸多领域的重要研究方法.

考虑到博弈论的工程应用日益广泛,本书主要关注工程领域尤其是电力系统控制与决策中的博弈问题,力图从控制与决策角度探讨工程博弈论的一般规律.笔者长期从事电力系统鲁棒控制研究工作,多年前即致力于运用微分博弈理论构造具有高抗干扰能力的鲁棒控制器.事实上,若将存在于人工系统运行过程中不确定性 (主要指外部干扰和内部未建模动态) 视为一个虚拟的决策主体,则线性/非线性 H_∞ 控制问题均可由二人零和微分博弈格局描述,而人们熟知的古典控制 (主要指 PID 控制)、线性最优控制和非线性控制等也可纳入统一的博弈论框架.

受控制理论发展及其工程应用推广的启发,本书的写作动机及思路遵循了一

般控制论到工程控制论的发展规律. 1948 年, Wiener 出版了其经典名著《控制论——或关于动物和机器中控制和通信的科学》, 该书原创性地提出了现代控制理论的基本概念和方法, 如反馈、稳定性和镇定等, 一般认为该书是控制论诞生的标志. Wiener 也由此赢得了巨大的学术声誉, 但学术界最初对该书的评价充满争议, 其中最尖锐的意见莫过于批评它太过宽泛模糊, 没有实用价值, 缺乏严格的理论基础. 1954 年, 钱学森出版了《工程控制论》一书, 实现了控制论与工程应用的紧密联系, 同时也平息了学术界对 Wiener 控制论的质疑.

需要指出的是, 当前面向电力工程实际的博弈论研究内容过于宽泛, 并有过度数学化的趋势, 同时过度依赖决策主体完全理性假设, 即现有工程博弈研究中通常假定各决策主体 (或参与者) 是完全理性的, 从而以各种优化方法研究其决策行为. 简言之, 现今的工程博弈论只能说是博弈论在工程中各种应用的集合, 内容庞杂, 缺少对工程博弈科学问题的凝练, 更未提炼出工程博弈的系统化方法, 可以说当前工程博弈论的现状非常类似于 Wiener 创立控制论时的情况, 迫切需要将其“工程化”. 有鉴于此, 我们大胆借鉴钱学森先生创建工程控制论的思路, 尝试探讨工程博弈论的基本理念和方法. 我们的基本观点是, 工程博弈论即是工程设计与试验中应用博弈论的基本概念、建模与求解方法及考虑工程实际的技术性条件进行决策的理论. 必须承认, 上述观点仅是我们的一家之言, 而我们在工程博弈领域的研究也不可避免地带有两个方面的局限: 一是理论层面, 我们关注博弈理论的出发点或研究基础是鲁棒控制, 即使从微分博弈高度看待鲁棒控制, 我们的视野也或多或少受到控制论出身的限制, 毕竟博弈论不同于控制论, 特别是博弈论的精华, 如 Nash 均衡和 von Neumann 的极小极大原理均在于处理以人为主体的决策行为, 而控制论则侧重于利用反馈应对大自然或人工系统的不确定性; 二是工程层面, 本书所探讨的工程实例来源于电力系统, 显然不能覆盖一般工程系统中具有共性的控制与决策等科学问题. 综合上述两个方面, 要完成一部类似“工程控制论”的“工程博弈论”著作, 对我们而言真可谓心有余而力不足. 事实上, 本书所述各项工作, 许多都来自于我们近年来的一些初步探索, 远远未臻完善, 尤其是安全博弈与演化博弈, 与建立完整的理论和实用化方法尚有很大差距. 虽然如此, 我们仍决定将这些不甚成熟的工作纳入本书, 期望能将我们从工程博弈的角度和方法研究电力系统控制与决策问题的心得体会奉献给读者, 以期抛砖引玉, 引起学术界和工程界对工程博弈论的重视从而带动它的发展. 本着严谨求实和勇于创新相结合的原则, 最终我们将本书定位为“工程博弈论基础”. 有鉴于此, 本书的内容可以分为三个部分. 第一部分是基础篇, 简要介绍博弈论的基本概念和理论体系; 第二部分是方法篇, 重点阐述工程博弈论对于解决多目标优化、鲁棒优化、鲁棒控制和多层优化等工程设计普遍面临的四个重要基础科学问题的思路与系统化求解方法; 第三部分是应用篇, 主要介绍电力系统工程博弈应用与设计实例.

本书在全面总结博弈论及其在工程技术领域国内外研究进展的基础上,重点介绍作者承担的国家自然科学基金委创新群体项目 (No.51321005)、“973”项目 (2012CB215103) 及中国电力科学研究院院士咨询项目 (XTB51201303968) 等有关课题所取得的最新研究成果. 本书所涉及的内容, 包括清华大学博士研究生王莹莹、王冠群、龚媛、刘斌、郭文涛、王程、梁易乐和李瑞等刻苦研究的成果, 在此一并向他们表示感谢.

衷心感谢导师卢强先生, 正是先生当年指导我用微分博弈理论研究电力系统鲁棒控制问题从而将我引入工程博弈论研究之门, 并在之后的探索之路上不断予以我鼓励且指点迷津. 衷心感谢我所在研究团队的沈沉教授, 陈来军、陈颖、张雪敏副教授和黄少伟老师的热心支持, 没有他们的鼎力相助和无私奉献, 要完成本书是不可想象的.

衷心感谢王光谦院士. 20 世纪 90 年代我在卢先生指导下从事大型水轮机组水门开度控制研究时, 遇到流体力学中“水锤效应”难题, 当时卢先生即让我向光谦先生请教, 从那时起我即非常关注光谦先生的研究工作. 也许水电有缘, 光谦先生在河流全流域水量调度、数字流域等方面的重大成就无不对电力系统智能调度、大电网仿真深有教益. 2013 年 7 月, 光谦先生肩负清华大学重托, 荣膺青海大学校长. 他远见卓识, 上任伊始即将新能源光伏产业作为青海大学的三大战略方向之一. 承蒙光谦先生厚爱, 我遂出任青海大学光伏研究中心主任, 至此在他直接指导下工作, 殊为荣幸. 两年来我在光伏中心开展的科研工作事无巨细, 无不得到他的关心和支持, 这些工作对本书形成了非常重要的理论和技术支撑, 相关成果业已纳入本书, 唯愿无负光谦先生之期望.

衷心感谢国家自然科学基金委丁立健教授. 早在 2012 年春季他就推荐和鼓励我以工程博弈论研究成果为内容申报“十二五”国家重点图书出版规划项目, 也正是从那个时候起我开始了本书的撰写工作. 衷心感谢国际著名电力系统专家吴复立先生. 吴先生 20 世纪 90 年代开创应用博弈论研究电力市场之先河, 取得的一系列开创性成果在学术界产生了深远影响. 在我们从事工程博弈论的研究过程中, 吴先生多次莅临清华大学指导工作, 极大坚定了我们克服困难勇攀高峰的信心. 本书的若干研究工作多次得到学术界同行专家的肯定. 例如, 本书 9.3 节研究成果发表于《中国电机工程学报》, 荣获 2014 年度“中国百篇最具影响优秀国内学术论文”; 12.3 节研究成果发表于《系统科学与数学》, 荣获“系统科学 2015 年最佳论文”; 14.3 节研究成果发表于《电力系统及其自动化学报》, 荣获 2014 年吴复立论文创新奖. 对我们而言不仅是荣誉更是激励. 特别值得一提的是, 本书作者之一魏鞅因在工程博弈论领域发表了一系列具有国际影响力的论文, 2015 年获聘新能源领域国际顶级期刊 *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 编委, 这是年轻学者不可多得的荣誉.

本书列入“十二五”国家重点图书出版规划项目，这是我莫大的荣幸，也是我及另外两位作者不断克服困难，最终得以完成本书的主要动力。

限于作者的研究视野和学术水平，书中难免存在疏漏和不妥之处。敬请读者批评指正。

梅生伟 谨 识

2015年4月于清华园

目 录

序 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 从控制与决策的角度看工程博弈问题	1
1.2 博弈论基础	4
1.3 工程博弈论关键基础科学问题	7
1.4 电力系统工程应用展望	10
1.4.1 电力系统规划	11
1.4.2 电力系统调度	11
1.4.3 电力系统控制	12
1.4.4 分布式电源与微电网	12
1.4.5 需求响应	13
1.4.6 电网安全	13
1.4.7 电网演化	14
1.5 本书的主要内容	15
参考文献	16

基 础 篇

第 2 章 数学基础	23
2.1 函数与映射	23
2.2 空间与范数	23
2.2.1 向量范数	24
2.2.2 诱导矩阵范数	25
2.3 连续性、可微性与紧性	26
2.4 集值映射及其连续性	28
2.5 凸集与凸函数	30
2.6 不动点与压缩映射	31
2.7 单目标优化问题	32
2.8 动态优化与最优控制	36

2.9	多目标优化与 Pareto 最优	39
2.10	动态规划与近似动态规划	41
2.10.1	动态规划	41
2.10.2	近似动态规划	42
2.11	概率论	44
2.11.1	样本、事件与概率	44
2.11.2	概率论若干基本定理	45
2.11.3	条件概率与全概率公式	45
2.11.4	Bayes 法则	46
2.12	随机过程	47
2.12.1	基本概念及统计特征	47
2.12.2	Poisson 过程和 Wiener 过程	49
2.12.3	Markov 过程与 Markov 链	50
2.13	随机微分方程	51
2.13.1	均方连续、均方导数与随机积分	51
2.13.2	三类简单随机微分方程	53
2.13.3	Ito 方程	54
	参考文献	54
第 3 章	静态非合作博弈	56
3.1	博弈论的基本概念	56
3.1.1	博弈的基本要素	56
3.1.2	标准型博弈	60
3.1.3	博弈论的基本假设	61
3.1.4	博弈的基本分类	62
3.1.5	标准型博弈的解	62
3.1.6	Nash 均衡	65
3.2	完全信息静态博弈	67
3.2.1	连续策略博弈	67
3.2.2	混合策略博弈	68
3.2.3	Nash 均衡的存在性	72
3.2.4	Nash 均衡的求解	74
3.2.5	二人零和博弈	75
3.3	不完全信息静态博弈	78
3.3.1	不完全信息	78
3.3.2	非对称信息的 Cournot 寡头竞争模型	79

3.3.3	不完全信息静态 (Bayes) 博弈	81
3.3.4	Bayes-Nash 均衡	86
3.3.5	不完全信息静态博弈的典型应用 —— 拍卖	87
3.3.6	混合策略的再认识	89
	参考文献	92
第 4 章	一般动态博弈	94
4.1	完全信息动态博弈	94
4.1.1	扩展式博弈	96
4.1.2	子博弈精炼 Nash 均衡	102
4.1.3	重复博弈	107
4.2	不完全信息动态博弈	117
4.2.1	不完全信息动态博弈的基本概念	117
4.2.2	精炼 Bayes-Nash 均衡	118
4.2.3	几种均衡概念的比较	125
4.2.4	不完全信息动态博弈的应用 —— 信号博弈	126
	参考文献	131
第 5 章	静态合作博弈	132
5.1	从非合作博弈到合作博弈	132
5.2	合作博弈的基本概念	133
5.3	合作博弈的分类	134
5.4	特征函数博弈	136
5.4.1	特征函数	136
5.4.2	支付与分配	137
5.4.3	超可加性博弈	139
5.5	合作博弈的稳定性	140
5.5.1	联盟的稳定性	140
5.5.2	核	141
5.5.3	近似的稳定结果 —— ϵ -核和最小核	145
5.5.4	核仁	147
5.5.5	DP 指标	148
5.6	分配的公平性	149
5.6.1	边际贡献	149
5.6.2	Shapley 值	151
5.7	合作博弈的计算问题	153
5.7.1	核的确定方法	153

5.7.2 Shapley 值的计算方法 154

5.8 讨价还价博弈 154

参考文献 156

第 6 章 微分博弈 157

6.1 非合作微分博弈 157

6.1.1 非合作微分博弈的数学描述 157

6.1.2 非合作微分博弈的三种 Nash 均衡 159

6.1.3 二人零和非合作微分博弈 161

6.2 合作微分博弈 164

6.3 主从微分博弈 166

6.3.1 主从微分博弈的 Stackelberg 均衡 166

6.3.2 主从微分博弈的最优性条件 168

6.4 说明与讨论 172

参考文献 172

第 7 章 演化博弈 174

7.1 两个自然界例子 174

7.1.1 狮子和斑马捕食 174

7.1.2 鹰鸽博弈 175

7.2 演化博弈的基本理论 177

7.2.1 演化博弈的基本内容与框架 177

7.2.2 演化博弈的分类 178

7.2.3 适应度函数 178

7.2.4 演化过程 179

7.2.5 演化稳定均衡 181

7.3 经典博弈问题的再认识 186

7.4 演化博弈与经典博弈的关系 188

7.4.1 Nash 均衡对演化博弈的诠释 188

7.4.2 经典博弈的困惑 189

7.4.3 经典博弈与演化博弈的区别 189

7.5 说明与讨论 190

参考文献 190

方 法 篇

第 8 章 多目标优化问题的博弈求解方法 195

8.1	多目标优化问题及 Pareto 解	195
8.2	综合法	198
8.2.1	多目标优化问题的博弈模型	198
8.2.2	非合作博弈求解方法	199
8.2.3	合作博弈求解方法	199
8.2.4	Nash 均衡与 Pareto 最优解的关系	200
8.3	加权系数法	205
8.4	Nash 谈判法	209
8.5	说明与讨论	213
	参考文献	213
第 9 章	鲁棒优化问题的博弈求解方法	215
9.1	鲁棒优化问题的博弈诠释	216
9.2	不确定性刻画及最优策略保守性讨论	217
9.2.1	不确定性的刻画	217
9.2.2	参数选择	219
9.3	静态鲁棒优化问题	222
9.3.1	静态鲁棒优化问题的数学模型	222
9.3.2	静态鲁棒优化问题的求解算法	226
9.4	动态鲁棒优化问题	226
9.4.1	ARO 的数学模型	227
9.4.2	ARO 的求解方法	228
9.5	说明与讨论	236
	参考文献	237
第 10 章	鲁棒控制问题的博弈求解方法	240
10.1	鲁棒控制问题的博弈诠释	240
10.2	鲁棒控制问题的数学模型	242
10.3	鲁棒控制问题的微分博弈模型	244
10.3.1	参与者	244
10.3.2	支付	244
10.3.3	约束条件	245
10.4	鲁棒控制器的构造	245
10.4.1	变尺度反馈线性化 H_∞ 设计方法	249
10.4.2	基于 Hamilton 系统的设计方法	252
10.4.3	策略迭代法	255
10.4.4	基于 ADP 的鲁棒控制在线求解方法	256

10.5 说明与讨论	258
参考文献	259
第 11 章 双层优化问题的博弈求解方法	261
11.1 双层优化问题简介	261
11.2 N-S-N 博弈的数学模型	263
11.3 N-S-N 博弈的求解方法	264
11.3.1 不动点型迭代算法	265
11.3.2 驻点法	265
11.3.3 驻点优化法	268
11.4 半零和双线性主从博弈	271
11.5 广义 Nash 博弈	272
11.6 说明与讨论	275
参考文献	276

应 用 篇

第 12 章 风-光-储混合电力系统规划设计实例	281
12.1 HPS 简介	281
12.2 HPS 最佳容量设计	284
12.2.1 容量设计的非合作博弈模型	284
12.2.2 Nash 均衡的存在性	293
12.2.3 博弈模型的求解方法	295
12.2.4 实例分析	297
12.3 HPS 分配策略	305
12.3.1 HPS 规划的联盟型表述	306
12.3.2 稳定分配的条件	307
12.3.3 改进 DP 指标	311
12.3.4 5 种典型分配策略	312
12.3.5 分配策略的分析	314
12.4 说明与讨论	316
参考文献	317
第 13 章 鲁棒调度设计实例	318
13.1 鲁棒经济调度	318
13.1.1 数学模型	319
13.1.2 求解算法	323

13.1.3	仿真分析	323
13.2	鲁棒备用整定	334
13.2.1	不确定性的刻画	335
13.2.2	鲁棒备用整定的 AR \odot 模型	336
13.2.3	算例分析	338
13.3	鲁棒机组组合	343
13.3.1	传统机组组合	344
13.3.2	鲁棒机组组合数学模型	346
13.3.3	算例分析	348
13.4	省级电网应用实例	353
13.4.1	系统概况	353
13.4.2	节能减排政策的考虑	354
13.4.3	鲁棒机组组合	355
13.4.4	鲁棒备用整定	356
13.5	说明与讨论	356
	参考文献	357
第 14 章	若干电力经济问题实例	360
14.1	碳排放税的制定	360
14.1.1	概述	360
14.1.2	博弈模型	362
14.1.3	实例分析	365
14.2	静态备用容量配置	371
14.2.1	概述	371
14.2.2	博弈模型	373
14.2.3	求解算法	382
14.2.4	实例分析	383
14.3	中长期购电计划	394
14.3.1	概述	394
14.3.2	博弈模型及求解算法	395
14.3.3	实例分析	397
14.4	零售市场的定价与调度	400
14.4.1	概述	400
14.4.2	博弈模型	401
14.4.3	实例分析	408
14.5	说明与讨论	412

参考文献	413
第 15 章 鲁棒控制设计实例	416
15.1 水轮机励磁与调速的协调鲁棒控制	416
15.1.1 多机系统数学模型	416
15.1.2 镇定控制器设计	420
15.1.3 工作点调节问题	421
15.1.4 鲁棒控制器设计	422
15.1.5 控制效果	424
15.2 非线性鲁棒电力系统稳定器	429
15.2.1 多机系统数学模型	429
15.2.2 NR-PSS 控制器设计	430
15.2.3 NR-PSS 动模实验	434
15.3 负荷频率鲁棒控制器设计	440
15.3.1 负荷频率鲁棒控制模型	440
15.3.2 负荷频率鲁棒控制的在线求解	441
15.4 STATCOM 在线鲁棒控制器设计	445
15.4.1 考虑干扰的含 STATCOM 的单机无穷大系统模型	445
15.4.2 STATCOM 非线性鲁棒控制器在线设计	446
15.5 说明与讨论	451
参考文献	452
第 16 章 网络安全博弈设计实例	454
16.1 安全博弈及其构成要素	455
16.1.1 参与者	455
16.1.2 策略空间	455
16.1.3 支付	456
16.1.4 信息结构	456
16.2 安全博弈的数学模型	457
16.2.1 攻击者-防御者 (A-D) 模型	457
16.2.2 防御者-攻击者 (D-A) 模型	459
16.2.3 防御者-攻击者-防御者 (D-A-D) 模型	460
16.3 求解方法	460
16.3.1 攻击者-防御者 (A-D) 模型	460
16.3.2 防御者-攻击者 (D-A) 模型	462
16.3.3 防御者-攻击者-防御者 (D-A-D) 模型	463
16.4 应用设计实例	470