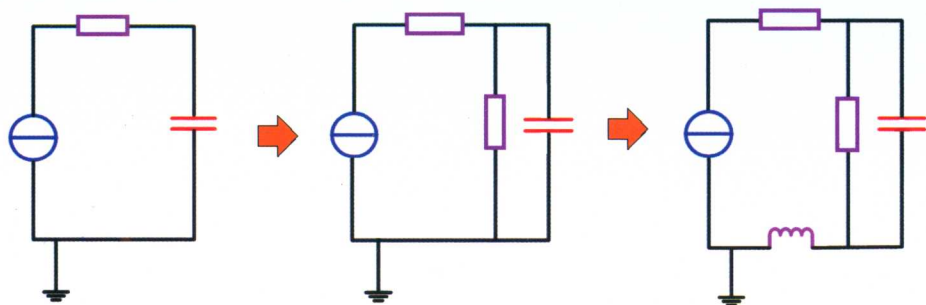


不可逆过程的 广义热力学动态优化

Generalized Thermodynamic Dynamic-Optimization
of Irreversible Processes

陈林根 夏少军 著



科学出版社

国家自然科学基金项目 (No. 51576207) 资助出版

不可逆过程的广义热力学 动态优化

**Generalized Thermodynamic Dynamic-Optimization
of Irreversible Processes**

陈林根 夏少军 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

基于广义热力学优化理论,本书对工程界和人类社会中广泛存在的不可逆热流、质量流、电流和商品流传递过程开展了动态优化研究。本书汇集著者多年研究成果,第1章介绍有限时间热力学、熵产生最小化、广义热力学优化、㶲理论等各种热学优化理论的产生、发展与物理内涵,并回顾与本书相关的动态优化问题的研究现状。第2~7章分别对传热过程、传质过程、电容器充电与电池做功电路、贸易过程和广义流传递过程动态优化问题进行研究,提出广义热力学动态优化理论,给出解决各种不可逆广义流传递过程动态优化问题的统一方法以及普适研究结果。本书在研究方法上以交叉、移植和类比为主,最大特点在于深化物理学理论研究的同时,注重多学科交叉融合研究并紧贴工程实际,在研究过程中追求物理模型的统一性、优化方法的通用性和优化结果的普适性,最终实现基于广义热力学优化理论的不可逆过程动态优化研究成果集成。

本书内容丰富、结构严谨、概念新颖、难易适中,可供能源、动力、化工、电子、经济等领域的科技人员参考,也可作为高等院校能源动力类相关专业本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

不可逆过程的广义热力学动态优化 = Generalized Thermodynamic Dynamic-Optimization of Irreversible Processes /陈林根,夏少军著. —北京:科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-053854-3

I. ①不… II. ①陈… ②夏… III. ①工程热力学—研究 IV. ①TK123

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第139683号

责任编辑:陈构洪 陈 琼 武 洲 / 责任校对:王 瑞

责任印制:张 倩 / 封面设计:铭轩堂

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>

北京新华印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年6月第一次印刷 印张:22

字数:450 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



陈林根(1964—)，男，浙江海盐人，教授，博士生导师，中国人民解放军海军工程大学动力工程学院院长，舰船动力工程军队重点实验室主任，舰船动力工程国家级实验教学示范中心主任。主要从事有限时间热力学、自然组织构形理论、叶轮机械最优设计、现代维修理论和工程研究。因教学科研和人才培养工作成绩卓著，荣立二等功1次，三等功3次。获湖北省自然科学二、三等奖7项，军队科技进步二、三等奖5项，军队教学成果二、三等奖3项。获首届中国科学技术协会“求是杰出青年实用工程奖”和“全国百篇优秀博士学位论文奖”。被评为全军院校教书育人优秀教师，全军优秀教师，全军优秀博士。获政府特殊津贴，中国人民解放军优秀专业技术人员一类岗位津贴。入选教育部“新世纪优秀人才支持计划”和“新世纪百千万人才工程”国家级人选。

主持国家973计划课题、国防973计划子课题、国家重点研发计划子课题、国家自然科学基金等国家级项目9项，总装备部和海军装备部项目31项，教育科研项目8项。已出版英文专著2部、中文专著6部、译著15部，发表学术论文660篇，其中，540余篇为SCI摘录，580余篇为EI摘录，22篇为ESI高被引论文，7200余篇次为国外学者引用，2700余篇次为国内学者引用。入选Elsevier 2014年、2015年、2016年中国高被引学者，在能源领域高被引学者榜单中分别位列全国第一、第二、第二。入选2016年“全球能源科学与工程学科高被引学者”名单。

指导出站博士后8名，毕业博士研究生23名、硕士研究生33名。获得2个全国优秀博士学位论文提名指导教师奖，54个海军、全军和湖北省优秀博士、硕士学位论文指导教师奖。

应聘担任教育部高等学校能源动力类专业教学指导委员会副主任委员，中国工程热物理学会理事，中国工程热物理学会工程热力学分会副主任委员，全国高校工程热物理学会副理事长，4个国家和省部级重点实验室学术委员会委员，1家国际学术刊物的主编，13家国际学术刊物和4家国内学术刊物的编委。



夏少军(1986—),男,湖北仙桃人。2007年毕业于中国人民解放军海军工程大学舰艇动力工程专业,获学士学位;2012年毕业于中国人民解放军海军工程大学动力工程及工程热物理专业,获博士学位。现为中国人民解放军海军工程大学动力工程学院热力工程教研室讲师,主要从事现代热力学优化理论及其应用基础研究。

先后获 2013 年度全军和湖北省优秀博士学位论文奖、2015 年湖北省自然科学奖二等奖 1 项、2015 年军队教学成果三等奖 1 项,立三等功 2 次。主持国家自然科学基金项目 1 项、大学基金项目 3 项,参与国家 973 计划课题、国家自然科学基金项目等国家级课题 8 项。出版学术专著 2 部,发表学术论文 68 篇,40 篇发表在 *Energy*、*J. Appl. Phys.* 等国际学术刊物上,14 篇发表在《中国科学》和《科学通报》中、英文版上,38 篇为 SCI 摘录,39 篇为 EI 摘录,2 篇论文入选 ESI 高被引论文,2 篇论文入选中国科技期刊 F5000 顶尖学术论文,1 篇论文获《中国科学》高引次优秀论文奖,已发表论文被 SCI 他引 260 余篇次。入选中国人民解放军海军工程大学首批“33511 人才工程”支持计划。担任中国工程热物理学会热力学青年论坛组委会委员。

前 言

节能是我国国民经济可持续发展的基本国策, 工程中各种节能手段与措施的实施迫切需要先进的节能理论提供指导。本书在全面系统地了解现今各种热学优化理论和总结前人已有研究成果的基础上, 基于广义热力学优化理论的思想, 选定热流、质量流、电流、商品流等各种广义流传递过程的动态优化问题为突破口, 将热力学、传热传质学、流体力学、化学反应动力学、电学、经济学、最优控制理论相结合, 分析研究传热过程、传质过程、电容器充电过程和电池做功电路、贸易过程等各种不可逆过程的最优构型, 获得各类不可逆过程的优化新准则, 同时探索建立统一的广义热力学过程物理模型, 寻求统一的优化方法, 获得普适的优化结果和研究结论, 已有相关研究结果均为本结果的特例, 有助于促进热力学优化理论成体系地向前发展和完善, 可为各类传输过程及实际装置的优化设计提供科学依据和理论指导。

本书主要由以下五个部分组成。

第一部分研究不可逆传热过程的动态优化问题。第2章将有限时间热力学和熵耗散极值原理相结合, 研究普适传热规律 $[q \propto \Delta(T^n)^m]$ 下无热漏与有热漏时传热过程的熵产生最小化和熵耗散最小化, 得到热、冷流体温度间的最佳关系式, 确定各种传热规律和两种不同优化目标下传热过程的优化准则。此外, 还研究液-固相变传热过程熵耗散最小化。

第二部分研究不可逆传质过程的动态优化问题。第3章将有限时间热力学和质量积耗散极值原理相结合, 研究普适传质规律下等温节流、无质漏与有质漏时单向等温传质、双向等温传质和等温结晶过程的熵产生最小化和积耗散最小化, 得到上述传质过程两侧压力、浓度和化学势间的最佳关系式, 确定各种传质规律和两种不同优化目标下传质过程的优化准则。

第三部分研究不可逆电容器充电过程和电池做功电路的动态优化问题。第4章首先研究简单RC电路、存在旁通电阻器的RC电路和LRC电路中非线性电容器充电过程焦耳热耗散最小化, 确定各种电路模型下非线性电容器充电过程的优化准则; 然后研究具有内耗散的非线性等效电容原电池做功电路的最大输出功, 确定非线性电容电池的最佳性能界限; 最后研究普适化学反应 $aA + bB \rightleftharpoons xX + yY$ 下理想搅拌式与耗散流燃料电池最大输出功和最大利润, 确定一类复杂化学反应下燃料电池的最佳性能界限。第7章对RC电路中电容器充电过程进行实验研究, 所得不同充电策略下电阻器实际电压变化规律与其对应的理论分析结果一致。

第四部分研究不可逆贸易过程和商业机循环的动态优化问题。第 5 章研究普适传输规律 $[n \propto \Delta(P^m)]$ 下无商品流漏和存在商品流漏时贸易过程的资本耗散最小化, 得到贸易过程商品价格间的最佳关系式, 确定各种商品传输规律下贸易过程的优化准则。

第五部分研究不可逆广义流传递过程的动态优化问题。在总结和归纳第 2~5 章研究内容的基础上, 第 6 章分别建立简单广义流传递过程、存在广义流漏的广义流传递过程等不可逆过程的物理模型, 研究过程的广义耗散最小化, 探索统一的优化方法, 获得普适的优化结果和研究结论, 初步实现基于广义热力学优化理论的不可逆过程动态优化研究成果集成。

最后, 感谢国家自然科学基金项目 (No. 51576207), 使得不可逆过程广义热力学动态优化的研究工作不断拓展和深化。

由于时间仓促, 本书在撰写过程中难免出现一些疏漏, 不当之处请批评指正。

陈林根 夏少军

2017 年 2 月

Preface

Energy saving is the basic national policy for the sustainable development of China's national economy, and the implementation of various energy-saving methods and measures in engineering needs advanced energy-saving theory to provide guidelines urgently. On the basis of understanding current various thermodynamic optimization theories and summarizing the previous research results, this book investigates the dynamic optimization problems of various generalized flow (including heat flow, mass flow, electric current, commodity flow and so on) transfer processes with the idea of generalized thermodynamic optimization theory. Thermodynamics, heat and mass transfer, fluid mechanics, chemical reaction kinetics, electricity, economics and optimal control theory are combined with each other in this book. The optimal configurations of irreversible processes such as heat transfer processes, mass transfer processes, capacitor charging processes and power battery circuits, and resource exchange processes are analyzed and investigated. New optimization criteria for various irreversible processes are obtained. Besides, establishments of unified physical models of generalized thermodynamic processes are explored, unified optimization methods are searched, generalized optimization results and research conclusions are obtained, and the related results obtained in previous literatures are special cases of those obtained in this book. It contributes to the systematic development and perfection of thermodynamic optimization theory, and can provide scientific bases and theoretical guidelines for optimal designs and operations of various transport processes and practical devices.

It consists of the following five parts:

The first part concentrates on the dynamic optimization problems of irreversible heat transfer processes. Chapter 2 investigates entropy generation minimization and thermal entransy dissipation minimization of generalized law $[q \propto \Delta(T^n)^m]$ heat transfer processes with and without heat leakage by combining finite-time thermodynamics and thermal entransy dissipation extremum principle, derives the optimal relationships between hot- and cold-fluid temperatures, and determines optimization criteria of heat transfer processes with various heat transfer laws and two different optimization objectives. Besides, entransy dissipation minimization of

liquid-solid phase change process is also investigated.

The second part concentrates on the dynamic optimization problems of irreversible mass transfer processes. Chapter 3 investigates entropy generation minimization and mass entransy dissipation minimization of generalized law isothermal throttling, one-way isothermal mass transfer without and with mass leakage, two-way isothermal equimolar mass transfer and isothermal crystallization, derives optimal relationships of pressure, concentration and chemical potential between the two sides of the mass transfer processes mentioned above, and determines optimization criteria of the mass transfer processes with various mass transfer laws and two different optimization objectives.

The third part concentrates on the dynamic optimization problems of irreversible capacitor charging processes and power battery circuits. Chapter 4 first investigates Joule-heat dissipation minimization of nonlinear capacitor charging processes in simple RC circuit, RC and LRC circuits with by-pass resistors, and determines optimization criteria of nonlinear capacitor charging processes in different circuit models. Then the maximum work output of a power primary-battery circuit with internal dissipation and the nonlinear capacitance is also investigated. It determines the optimal performance limit of the battery with the nonlinear capacitance. Finally, the maximum work output and the maximum profit of well-stirred and diffusive flow fuel cells with the generalized chemical reaction $aA + bB \rightleftharpoons xX + yY$ are investigated. It determines the optimal performance limits of a class of fuel cells with the complex chemical reaction. Chapter 7 reports the experimental results of capacitor charging processes in the RC circuit, and real voltage profiles of the resistor for different charging strategies are consistent with the corresponding results of theoretical analyses.

The fourth part concentrates on the dynamic optimization problems of irreversible resource exchange processes. Chapter 5 investigates capital dissipation minimization of generalized law $[n \propto \Delta(P^m)]$ resource exchange processes without and with commodity flow leakage, derives the optimal relationships of commodity prices for the resource exchange processes, and determines optimization criteria of the resource exchange processes with various commodity transfer laws.

The fifth part concentrates on the dynamic optimization problems of irreversible generalized flow transfer processes. On the basis of summarizing and inducing the research contents from Chapter 2 to Chapter 5, Chapter 6 establishes physical models of irreversible processes including simple generalized flow transfer process and

generalized flow transfer process with generalized flow leakage, investigates generalized dissipation minimization of the processes, explores the unified optimization methods, and derives the generalized optimization results and research conclusions. Integration of dynamic optimization research on irreversible processes in the frame of generalized thermodynamic optimization theory is preliminary realized.

Finally, thanks to the National Natural Science Foundation of China (No. 51576207), which makes the researches on the generalized thermodynamic dynamic-optimization of irreversible processes have been extended and deepened.

Due to the rush of time, there may be some errors and omissions in this book inevitably, and it is hoped that the readers will kindly point out them.

Lingen Chen, Shaojun Xia
February 2017

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 有限时间热力学的产生、内涵和研究内容	2
1.2.1 有限时间热力学的产生与发展	2
1.2.2 有限时间热力学的物理内涵	6
1.2.3 有限时间热力学的研究内容	7
1.3 熵产生最小化理论的产生和物理内涵	9
1.3.1 熵产生最小化理论的产生与发展	9
1.3.2 熵产生最小化理论的物理内涵	12
1.4 ㊟理论的产生、内涵和研究内容	15
1.4.1 ㊟理论的产生与发展	15
1.4.2 ㊟理论的物理内涵	17
1.4.3 ㊟理论的研究内容	18
1.5 广义热力学优化理论的产生和研究内容	19
1.5.1 广义热力学优化理论的产生与发展	19
1.5.2 广义热力学优化理论的研究内容	20
1.6 传热过程动态优化现状	24
1.6.1 牛顿传热规律下相关研究	24
1.6.2 传热规律的影响	26
1.7 传质过程动态优化现状	27
1.8 电容器充电和电池做功电路动态优化现状	28
1.8.1 电容器充电过程相关研究	28
1.8.2 原电池放电过程相关研究	29
1.9 贸易过程动态优化现状	29
1.10 本书的主要工作及章节安排	30
第 2 章 传热过程动态优化	32
2.1 引言	32
2.2 普适传热规律下传热过程熵产生最小化	32
2.2.1 物理模型	32

2.2.2	优化方法	34
2.2.3	其他传热策略	34
2.2.4	特例分析	35
2.2.5	数值算例与讨论	37
2.3	热漏对传热过程熵产生最小化的影响	40
2.3.1	物理模型	40
2.3.2	优化方法	42
2.3.3	其他传热策略	43
2.3.4	特例分析	44
2.3.5	数值算例与讨论	50
2.4	普适传热规律下传热过程焓耗散最小化	59
2.4.1	物理模型	59
2.4.2	优化方法	60
2.4.3	特例分析	61
2.4.4	数值算例与讨论	63
2.5	传热过程焓耗散最小逆优化	70
2.5.1	物理模型	70
2.5.2	优化方法	71
2.5.3	特例分析与讨论	72
2.6	热漏对传热过程焓耗散最小化的影响	75
2.6.1	物理模型	75
2.6.2	优化方法	76
2.6.3	特例分析	77
2.6.4	数值算例与讨论	80
2.7	液-固相变传热过程焓耗散最小化	91
2.7.1	物理模型	91
2.7.2	优化方法	93
2.7.3	其他传热策略	95
2.7.4	数值算例与讨论	98
2.8	本章小结	100
第3章	传质过程动态优化	102
3.1	引言	102
3.2	普适传质规律下等温节流过程积耗散最小化	103
3.2.1	物理模型	103
3.2.2	优化方法	104
3.2.3	其他传质策略	105

3.2.4	特例分析	106
3.2.5	数值算例与讨论	109
3.3	普适传质规律下单向等温传质过程积耗散最小化	114
3.3.1	物理模型	114
3.3.2	优化方法	117
3.3.3	其他传质策略	117
3.3.4	特例分析	119
3.3.5	数值算例与讨论	122
3.4	存在质漏的单向等温传质过程熵产生最小化	127
3.4.1	物理模型	127
3.4.2	优化方法	128
3.4.3	特例分析	129
3.4.4	数值算例与讨论	131
3.5	质漏对单向等温传质过程积耗散最小化的影响	134
3.5.1	物理模型	134
3.5.2	优化方法	135
3.5.3	特例分析	135
3.5.4	数值算例与讨论	137
3.6	扩散传质规律下等摩尔双向等温传质过程积耗散最小化	141
3.6.1	物理模型	141
3.6.2	优化方法	142
3.6.3	其他传质策略	144
3.6.4	数值算例与讨论	145
3.7	普适传质规律下等温结晶过程熵产生最小化	147
3.7.1	物理模型	147
3.7.2	优化方法	148
3.7.3	其他传质策略	149
3.7.4	特例分析	149
3.7.5	数值算例与讨论	152
3.8	普适传质规律下等温结晶过程积耗散最小化	154
3.8.1	物理模型	154
3.8.2	优化方法	155
3.8.3	特例分析	155
3.8.4	数值算例与讨论	156
3.9	本章小结	159

第 4 章 电容器充电和电池做功电路动态优化	160
4.1 引言	160
4.2 非线性 RC 电路最优充电过程	162
4.2.1 物理模型	162
4.2.2 优化方法	163
4.2.3 特例分析与讨论	166
4.3 存在旁通电阻器的 RC 电路非线性电容器最优充电过程	173
4.3.1 物理模型	173
4.3.2 优化方法	173
4.3.3 特例分析与讨论	174
4.4 存在旁通电阻器的 LRC 电路非线性电容器最优充电过程	179
4.4.1 物理模型	179
4.4.2 优化方法	180
4.4.3 特例分析与讨论	181
4.5 具有内耗散的非线性电容电池最大输出功	186
4.5.1 物理模型	186
4.5.2 优化方法	187
4.5.3 特例分析与讨论	188
4.6 复杂反应燃料电池最优电流路径	197
4.6.1 物理模型	197
4.6.2 优化方法	202
4.6.3 数值算例与讨论	207
4.7 本章小结	212
第 5 章 贸易过程动态优化	214
5.1 引言	214
5.2 一类简单贸易过程资本耗散最小化	214
5.2.1 物理模型	214
5.2.2 优化方法	219
5.2.3 其他交易策略	220
5.2.4 特例分析	221
5.2.5 数值算例与讨论	224
5.3 商品流漏对贸易过程资本耗散最小化的影响	229
5.3.1 物理模型	229
5.3.2 优化方法	230
5.3.3 特例分析与讨论	232

5.4 本章小结	234
第 6 章 广义流传递过程动态优化	235
6.1 引言	235
6.2 广义流传递过程的广义耗散最小化	236
6.2.1 物理模型	236
6.2.2 优化结果	237
6.2.3 应用	239
6.3 广义流漏对广义流传递过程广义耗散最小化的影响	245
6.3.1 物理模型	245
6.3.2 优化结果	246
6.3.3 应用	246
6.4 本章小结	249
第 7 章 电容器充电电路实验研究	250
7.1 实验装置与实验方法	250
7.2 实验结果分析	252
7.3 本章小结	255
第 8 章 全书总结	256
参考文献	260
附录 A 最优化理论概述	297
A.1 引言	297
A.2 静态优化	298
A.2.1 无约束函数极值优化	298
A.2.2 仅含等式约束函数极值优化	299
A.2.3 含不等式约束函数极值优化	300
A.3 动态优化	301
A.3.1 古典变分法	302
A.3.2 极小值原理	307
A.3.3 动态规划	310
A.3.4 平均最优控制理论	316
A.4 本附录小结	318
附录 B 第 6 章相关公式推导	319
B.1 6.2 节中定理的证明	319
B.1.1 欧拉-拉格朗日方程方法	319
B.1.2 平均最优控制理论方法	321

B.2 6.3 节中定理的证明.....	321
B.2.1 欧拉-拉格朗日方程方法.....	321
B.2.2 平均最优控制理论方法.....	323
附录 C 主要符号说明	324

Contents

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction	1
1.2 The emergence, connotation and research contents of finite time thermodynamics	2
1.2.1 The emergence and development of finite time thermodynamics	2
1.2.2 The physical connotation of finite time thermodynamics	6
1.2.3 The research contents of finite time thermodynamics	7
1.3 The emergence and connotation of entropy generation minimization theory	9
1.3.1 The emergence and development of entropy generation minimization theory	9
1.3.2 The physical connotation of entropy generation minimization theory	12
1.4 The emergence, connotation and research contents of entransy theory	15
1.4.1 The emergence and development of entransy theory	15
1.4.2 The physical connotation of entransy theory	17
1.4.3 The research contents of entransy theory	18
1.5 The emergence and research contents of generalized thermodynamic optimization theory	19
1.5.1 The emergence and development of generalized thermodynamic optimization theory	19
1.5.2 The research contents of generalized thermodynamic optimization theory	20
1.6 The dynamic-optimization status of heat transfer processes	24
1.6.1 The cases with Newtonian heat transfer law	24
1.6.2 Effects of heat transfer laws	26
1.7 The dynamic-optimization status of mass transfer processes	27
1.8 The dynamic-optimization status of capacitor charging processes and power battery circuits	28
1.8.1 Capacitor charging processes	28
1.8.2 Primary battery discharging processes	29
1.9 The dynamic-optimization status of resource exchange processes	29