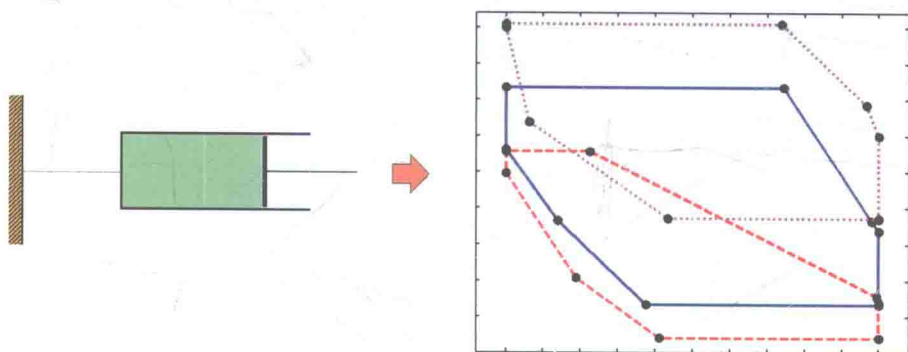


不可逆循环的 广义热力学动态优化

——热力与化学理论循环

Generalized Thermodynamic Dynamic-Optimization of Irreversible Cycles:
Thermodynamic and chemical theoretical cycles

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

不可逆循环的广义热力学动态优化 ——热力与化学理论循环

**Generalized Thermodynamic Dynamic-Optimization
of Irreversible Cycles: Thermodynamic and chemical
theoretical cycles**

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功、热能、电能、化学能和资本等广义能量转换循环与系统开展了动态优化研究,获得了不同优化目标下的最优构型。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、㊟理论等各种热学优化理论的产生,并回顾与本书相关的动态优化问题的研究现状。第2~8章分别对恒温热源内可逆热机循环、变温热源热机循环、具有非均匀工质的热机性能界限、多级热力循环系统、化学机循环、多级等温化学循环系统、多级非等温不可逆化学机系统的动态优化(最优构型)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能量转换循环与系统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一致性、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循环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、航空航天、船舶工程、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

不可逆循环的广义热力学动态优化:热力与化学理论循环/陈林根,夏少军著.一北京:科学出版社,2018.1

ISBN 978-7-03-055296-9

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274417号

责任编辑:陈构洪 陈 琮 武 洲/责任校对:桂伟利
责任印制:张 伟/封面设计:北京铭轩堂广告设计有限公司

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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年1月第一次印刷 印张:25

字数:473 000

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8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才一类岗位津贴。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10项,军委科技委、总装备部和海军装备部项目32项,教育科研项目8项。已出版英文专著2部,中文专著7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,57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6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、国家重点研发计划子课题、国家自然科学基金项目等国家级课题 9 项。出版学术专著 3 部,发表学术论文 70 篇,41 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,40 篇为 SCI 摘录,41 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 280 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力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,选定功、热能、化学能、资本等广义能量转换循环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、经济学、最优控制理论相结合,分析研究理论热力循环、理论化学循环、工程热力与化学循环、商业机等不可逆循环在不同优化目标下的最优构型,获得各类不可逆循环新构型,同时探索建立统一的广义热力循环物理模型,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,可为各类能量转换系统及实际装置的优化设计与最优运行提供科学依据和理论指导。

本书主要由以下两个部分组成。

第一部分研究不可逆理论热力循环的动态优化问题。第2章在广义辐射传热规律 $[q \propto \Delta(T^n)]$ 条件下,研究恒温热源内可逆热机在无定压比约束时最大功率优化、有定压比约束时最大功率优化、给定输入能约束时最大效率优化情况下循环最优构型,揭示热导率、压比、输入能等因素对热机循环最优构型的影响。第3章在普适的有限热源热容模型和普适传热规律条件下,研究两有限热源内可逆热机、存在热阻和旁通热漏的有限高温热源不可逆热机最大输出功优化时循环最优构型,揭示热源热容特性、传热规律和热漏对理论热机最优循环构型与最优性能的影响。第4章研究线性唯象传热规律 $[q \propto \Delta(T^{-1})]$ 下具有非均匀工质的非回热不可逆热机最大功率和最大效率;进一步考虑传热和燃烧分别服从线性唯象传热规律和一类普适的反应速率方程,研究非均匀工质热机的最大功率和效率,确定线性唯象传热规律下一类非均匀工质热机最佳性能界限。第5章应用哈密顿-雅可比-贝尔曼(Hamilton-Jacobi-Bellman, HJB)理论研究普适传热规律 $[q \propto \Delta(T^n)^m]$ 下多级不可逆卡诺热机和卡诺热泵的极值功率,得到牛顿和线性唯象传热规律下优化问题的解析解,应用动态规划方法得到其他传热规律下优化问题的数值解,纠正已有文献中“将高温流体末态温度取为低温热源温度分析热机最大功率输出”的错误结果,得到“存在最佳的高温流体末态温度使多级热机系统输出功率达到最大”等研究新结果,确定不同传热规律下多级正反向热力循环系统的最佳性能界限。

第二部分研究不可逆理论化学循环的动态优化问题。第 6 章研究有限势库下等温内可逆化学机、存在质阻和质漏的等温不可逆化学机、非等温内可逆化学机的最大输出功优化时循环最优构型,揭示物质库势容特性、传质规律、质漏和非等温传质对化学机最优循环构型与最优性能的影响;此外还研究多库等温内可逆化学机最大功率输出优化时循环最优构型。第 7 章应用 HJB 理论研究多级等温不可逆化学机和内可逆化学泵系统的极值功率,得到线性传质规律 $[g \propto \Delta(\mu)]$ 下优化问题的解析解,应用动态规划方法得到扩散传质规律 $[g \propto \Delta(c)]$ 下优化问题的数值解,确定不同传质规律下多级等温正反向化学循环系统的最佳性能界限。第 8 章分别考虑传热传质间 Lewis 相似准则和服从线性不可逆热力学的 Onsager 方程,研究单级非等温不可逆化学机和多级非等温不可逆化学机系统的最大输出功率,确定不同传热传质耦合条件下多级非等温化学机系统的最佳性能界限。

本书在写作的过程中,参考著者所在团队毕业博士研究生宋汉江、马康、李俊、戈延林等同志的博士学位论文,他们为不可逆循环的广义热力学动态优化研究作出了重要贡献,著者在此对他们的辛勤劳动和创造性贡献表示诚挚的谢意。

最后,感谢国家自然科学基金项目(No. 51576207)的支持,使得不可逆循环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 8 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 energy (including work, thermal energy, chemical energy, capitals and so on) conversion cycles with the idea of generalized thermodynamic optimization theory. Thermodynamics, heat and mass transfer, fluid mechanics, chemical reaction kinetics, economics and optimal control theory are combined with each other in this book. The optimal configurations of irreversible cycles such as theoretical thermodynamic cycles, theoretical chemical cycles, engineering thermodynamic and chemical cycles, and commercial engines are analyzed and investigated. New configurations of various irreversible cycles are derived. Besides, establishments of unified physical models of generalized thermodynamic cycles 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 energy conversion systems and practical devices.

It consists of the following two parts:

The first part concentrates on the dynamic optimization problems of irreversible theoretical thermodynamic cycles. Chapter 2 investigates optimal cycle configurations of endoreversible heat engines with constant-temperature heat reservoirs and generalized radiative heat transfer law [$q \propto \Delta(T^n)$], three different cases including the maximum power optimization without constraint of compression ratio, the maximum power optimization with fixed compression ratio and the maximum efficiency optimization with fixed input energy are considered, and effects of changes of heat conductivity,

compression ratio and input energy on the optimal cycle configurations of the heat engines are also indicated. Under the conditions of both generalized finite-thermal-capacity reservoir models and generalized heat transfer laws, Chapter 3 investigates the optimal cycle configurations of heat engines with maximum work output of a two-finite-reservoir endoreversible heat engine and a finite high-temperature-reservoir irreversible heat engine with heat resistance and heat leakage, and indicates the effects of thermal capacity characteristics of heat reservoirs, heat transfer laws and heat leakage on optimal cycle configurations and optimal performances of the theoretical heat engines. Chapter 4 investigates the maximum power and maximum efficiency of irreversible non-regeneration heat engines with a non-uniform working fluid and linear phenomenological heat transfer law [$q \propto \Delta(T^{-1})$], and further investigates the maximum power and efficiency of a heat engine with the non-uniform working fluid by considering that heat transfer and combustion obey the linear phenomenological heat transfer law and a generalized chemical reaction rate equation, respectively, determines optimal performance limits of a class of heat engines with the non-uniform working fluid and the linear phenomenological heat transfer law. Chapter 5 investigates the extreme power of multistage irreversible Carnot heat engine and Carnot heat pump systems with the generalized heat transfer law [$q \propto \Delta(T^n)^m$] by applying Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) theory. Analytical solutions for Newtonian and linear phenomenological heat transfer laws are obtained, and numerical solutions for the other heat transfer laws are obtained by using the method of dynamic programming. Some new results such as “there is an optimal final temperature of the high-temperature fluid for the power output of the multistage heat engine system to achieve its maximum value” are also obtained, and the optimal performance limits of multistage forward and reverse thermodynamic cycle systems with different heat transfer laws are determined.

The second part concentrates on the dynamic optimization problems of irreversible theoretical chemical cycles. Chapter 6 investigates optimal cycle configurations of chemical engines, including the maximum work output of finite-potential-reservoir isothermal endoreversible chemical engine, isothermal irreversible chemical engine with mass resistance and mass leakage, and non-isothermal endoreversible chemical engine. It indicates effects of potential capacity characteristics of mass reservoirs, mass transfer laws, mass leakage and non-isothermal mass transfer on the optimal cycle configurations and optimal performances of the chemical engines.

Besides, the maximum power output of a multi-reservoir isothermal endoreversible chemical engine is also investigated. Chapter 7 investigates the extreme power of multistage isothermal irreversible chemical engine and endoreversible chemical pump systems by applying HJB theory, and derives analytical solutions of the optimization problems with linear mass transfer law [$g \propto \Delta(\mu)$]. Besides, numerical solutions of the optimization problems with diffusive mass transfer law [$g \propto \Delta(c)$] are also obtained by applying the dynamic programming method, and the optimal performance limits of multistage isothermal forward and reverse chemical cycle systems with different mass transfer laws are determined. Chapter 8 investigates the maximum power output of single-stage non-isothermal irreversible chemical engines and multistage non-isothermal irreversible chemical engine systems by considering heat and mass transfer obeying Lewis similarity criterion and Onsager equations in linear irreversible thermodynamics, respectively. It determines the optimal performance limits of multistage non-isothermal chemical engine systems with different coupling conditions of heat and mass transfer.

During the writing process of this book, the Ph. doctoral dissertations of Hangjiang Song, Kang Ma, Jun Li and Yanli Ge in the research group of the authours of the book were consulted. They have made important contributions to the research of generalized thermodynamic dynamic-optimization of irreversible cycles, and the authors herein express the sincere gratitude for their hard work and creative contributions.

Finally, thanks to the support of 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

August 2017

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 理论热力循环动态优化现状	2
1.2.1 恒温热源理论热机循环最优构型	2
1.2.2 变温热源理论热机循环最优构型	3
1.2.3 串接、联合和多热源理论热机循环最优构型	4
1.2.4 具有非均匀工质的理论热机性能界限	5
1.2.5 基于 HJB 理论的多级热力循环系统动态优化	5
1.3 理论化学循环动态优化现状	7
1.3.1 等温化学循环最优构型	7
1.3.2 非等温化学机循环最优构型	8
1.3.3 基于 HJB 理论的多级等温化学机循环系统动态优化	9
1.3.4 基于 HJB 理论的多级非等温化学机循环系统动态优化	9
1.4 本书的主要工作及章节安排	10
第 2 章 恒温热源内可逆热机循环动态优化	12
2.1 引言	12
2.2 广义辐射传热规律下无压比约束下内可逆热机最大输出功率	12
2.2.1 物理模型	12
2.2.2 优化方法	15
2.2.3 特例分析	23
2.3 广义辐射传热规律下给定压比的内可逆热机最大输出功率	47
2.3.1 物理模型	47
2.3.2 优化方法	48
2.3.3 特例分析	57
2.4 广义辐射传热规律下给定输入能的内可逆热机最大效率	89
2.4.1 物理模型	89
2.4.2 优化方法	89
2.4.3 特例分析	99
2.5 本章小结	124

第 3 章 变温热源热机循环动态优化	126
3.1 引言	126
3.2 两有限热容热源内可逆热机最大输出功	126
3.2.1 物理模型	126
3.2.2 优化方法	128
3.2.3 特例分析与讨论	130
3.3 存在热漏的有限高温热源不可逆热机最大输出功	134
3.3.1 物理模型	134
3.3.2 优化方法	134
3.3.3 特例分析与讨论	136
3.4 本章小结	138
第 4 章 具有非均匀工质的热机性能界限	139
4.1 引言	139
4.2 线性唯象传热规律下非均匀工质非回热不可逆热机 最大输出功率	139
4.2.1 物理模型	139
4.2.2 优化方法	142
4.2.3 数值算例与讨论	146
4.3 线性唯象传热规律下非均匀工质非回热 不可逆热机最大效率	149
4.3.1 物理模型	149
4.3.2 优化方法	150
4.3.3 数值算例与讨论	153
4.4 具有非均匀工质的一类理论热机最大功率和效率	155
4.4.1 物理模型	155
4.4.2 优化方法	158
4.4.3 不同反应速率方程和热阻模型下优化结果的比较	163
4.5 本章小结	164
第 5 章 基于 HJB 理论的多级热力循环系统动态优化	166
5.1 引言	166
5.2 普适传热规律下多级不可逆热机系统最大输出功率	166
5.2.1 系统建模与特性描述	166
5.2.2 优化方法	170
5.2.3 特例分析	171
5.2.4 数值算例与讨论	179
5.3 普适传热规律下多级不可逆热泵系统耗功率最小优化	197
5.3.1 系统建模与特性描述	197

5.3.2	优化方法	200
5.3.3	特例分析	201
5.3.4	数值算例与讨论	207
5.4	本章小结	211
第 6 章	化学机循环动态优化	213
6.1	引言	213
6.2	有限高势库等温内可逆化学机最大输出功	214
6.2.1	物理模型	214
6.2.2	优化方法	216
6.2.3	特例分析与讨论	218
6.3	存在质漏的有限高势库等温不可逆化学机最大输出功	224
6.3.1	物理模型	224
6.3.2	优化方法	225
6.3.3	特例分析与讨论	227
6.4	多库等温内可逆化学机最大输出功率	230
6.4.1	物理模型	230
6.4.2	优化方法	231
6.4.3	数值算例与讨论	234
6.5	基于 LIT 的有限高势库非等温内可逆化学机最大输出功	237
6.5.1	物理模型	237
6.5.2	优化方法	239
6.5.3	特例分析与讨论	241
6.6	本章小结	246
第 7 章	基于 HJB 理论的多级等温化学循环系统动态优化	248
7.1	引言	248
7.2	线性传质规律下多级等温不可逆化学机系统最大输出功率优化	249
7.2.1	系统建模与特性描述	249
7.2.2	优化方法	255
7.2.3	数值算例与讨论	260
7.3	扩散传质规律下多级等温不可逆化学机系统最大功率输出优化	271
7.3.1	系统建模与特性描述	271
7.3.2	优化方法	273
7.3.3	数值算例与讨论	275
7.4	线性传质规律下多级等温内可逆化学泵系统耗功率最小优化	278
7.4.1	系统建模与特性描述	278

7.4.2	优化方法	281
7.4.3	数值算例与讨论	282
7.5	本章小结	287
第 8 章	基于 HJB 理论的多级非等温不可逆化学机系统动态优化	288
8.1	引言	288
8.2	基于 Lewis 相似的单级非等温不可逆化学机最大输出功率	288
8.2.1	物理模型	288
8.2.2	优化方法	291
8.2.3	特例分析	294
8.2.4	数值算例与讨论	296
8.3	基于 Lewis 相似的多级非等温不可逆化学机系统最大输出功率	299
8.3.1	系统建模与特性描述	299
8.3.2	优化方法	301
8.3.3	特例分析	303
8.4	基于 LIT 的单级非等温不可逆化学机最大输出功率	305
8.4.1	物理模型	305
8.4.2	优化方法	306
8.4.3	特例分析	310
8.4.4	数值算例与讨论	311
8.5	基于 LIT 的多级非等温不可逆化学机系统最大输出功率	314
8.5.1	系统建模与特性描述	314
8.5.2	优化方法	317
8.5.3	特例分析	317
8.6	本章小结	319
第 9 章	全书总结	321
参考文献		327
附录 A	最优化理论概述	346
A.1	引言	346
A.2	静态优化	347
A.2.1	无约束函数极值优化	347
A.2.2	仅含等式约束函数极值优化	348
A.2.3	含不等式约束函数极值优化	349
A.3	动态优化	350
A.3.1	古典变分法	351
A.3.2	极小值原理	356

A.3.3 动态规划	359
A.3.4 平均最优控制理论	365
A.4 附录 A 小结	367
附录 B 主要符号说明	368

Contents

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction	1
1.2 The dynamic-optimization status of theoretical thermodynamic cycles	2
1.2.1 Optimal configurations of theoretical heat engine cycles with constant-temperature heat reservoirs	2
1.2.2 Optimal configurations of theoretical heat engine cycles with variable-temperature heat reservoirs	3
1.2.3 Optimal configurations of sequential, combined and multi- reservoir theoretical heat engine cycles	4
1.2.4 Performance limits for theoretical heat engines with a non-uniform working fluid	5
1.2.5 Dynamic-optimization of multistage thermodynamic cycle systems based on Hamilton-Jacobi-Bellman theory	5
1.3 The dynamic-optimization status of theoretical chemical cycles	7
1.3.1 Optimal configurations of isothermal chemical cycles	7
1.3.2 Optimal configurations of non-isothermal chemical cycles	8
1.3.3 Dynamic-optimization of multistage isothermal chemical cycle systems based on Hamilton-Jacobi-Bellman theory	9
1.3.4 Dynamic-optimization of multistage non-isothermal chemical cycle systems based on Hamilton-Jacobi-Bellman theory	9
1.4 The major work and chapters' arrangement of this book	10
Chapter 2 Dynamic-Optimization of Endoreversible Heat Engines with Constant- Temperature Heat Reservoirs	12
2.1 Introduction	12
2.2 Maximum power output of endoreversible heat engines with generalized radiative heat transfer law and without constraint of compression ratio	12
2.2.1 Physical model	12
2.2.2 Optimization method	15
2.2.3 Analyses for special cases	23

2.3	Maximum power output of endoreversible heat engines with generalized radiative heat transfer law and fixed compression ratio	47
2.3.1	Physical model	47
2.3.2	Optimization method	48
2.3.3	Analyses for special cases	57
2.4	Maximum efficiency of endoreversible heat engines with generalized radiative heat transfer law and fixed input energy	89
2.4.1	Physical model	89
2.4.2	Optimization method	89
2.4.3	Analyses for special cases	99
2.5	Chapter summary	124
Chapter 3	Dynamic-Optimization of Heat Engine Cycles with Variable-Temperature Heat Reservoirs	126
3.1	Introduction	126
3.2	Maximum work output of endoreversible heat engines with two finite thermal capacity heat reservoirs	126
3.2.1	Physical model	126
3.2.2	Optimization method	128
3.2.3	Analyses for special cases and discussions	130
3.3	Maximum work output of irreversible heat engines with finite high-temperature heat source and bypass heat leakage	134
3.3.1	Physical model	134
3.3.2	Optimization method	134
3.3.3	Analyses for special cases and discussions	136
3.4	Chapter summary	138
Chapter 4	Performance Limits of Heat Engines with a Non- Uniform Working Fluid	139
4.1	Introduction	139
4.2	Maximum power output of irreversible non-regeneration heat engines with the non-uniform working fluid and linear phenomenological heat transfer law	139
4.2.1	Physical model	139
4.2.2	Optimization method	142
4.2.3	Numerical examples and discussions	146
4.3	Maximum efficiency of irreversible non-regeneration heat engines with the	